

普通高等教育"十一五"国家级规划教材

普通物理实验 4

综合及设计部分

（第四版）

杨述武 赵立竹 沈国土 主编

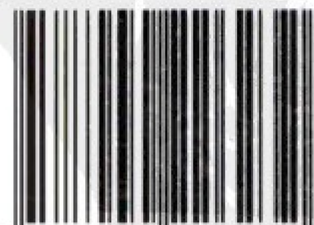
朱世国 乔 双 马葭生 舒信隆 赵立竹 编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通物理实验4

ISBN 978-7-04-022623-2



定价 13.10 元

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通物理实验 4

综合及设计部分

（第四版）

杨述武　赵立竹　沈国土　主编
朱世国　乔　双　马葭生　舒信隆　赵立竹　编

高等教育出版社

内容提要

《普通物理实验》一套书共4册，分为一、力学、热学部分，二、电磁学部分，三、光学部分，四、综合及设计部分。此次修订为第四版，保持了原书通用性好、可读性强及注重能力的培养的特色，并基本上保持了原来的框架，同时为适应教学的发展，在内容上有一些增删和改变。

本书是这套书的第四分册，为综合实验、设计实验及结合计算机实验。此书的修订内容较多。综合实验新增2题(共16题)，设计实验15题，改动原书7个题目，计算机部分6题，改变4题，6题都是结合实验的内容。

本书可作为高等学校本科物理专业普通物理实验课的教材，也可供师专使用。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理实验4，综合及设计部分/杨述武，赵立竹，沈国土主编.—4版.—北京：高等教育出版社，2007.12
ISBN 978-7-04-022623-2

Ⅰ.普… Ⅱ.①杨…②赵…③沈… Ⅲ.普通物理学-实验-高等学校-教材 Ⅳ.O4-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第161404号

策划编辑 高 建 **责任编辑** 张海雁 **封面设计** 张志奇 **责任绘图** 吴文信
版式设计 王艳红 **责任校对** 朱惠芳 **责任印制** 宋克学

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
			http://www.landraco.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	畅想教育	http://www.widedu.com
印 刷	高等教育出版社印刷厂		
		版 次	1983年4月第1版
开 本	787×960 1/16		2007年12月第4版
印 张	12	印 次	2007年12月第1次印刷
字 数	220 000	定 价	13.10元

物料号 22623-00

第四版前言

本套书共四册,一、力学、热学部分,二、电磁学部分,三、光学部分,四、综合及设计部分。本册书是第二分册。

2005年11月,我们接到高等教育出版社的委托书,让我们对现用的第三版进行修订。我们商讨之后,和出版社共同认定,此次修订的原则是在保持原书基本框架的条件下,删去过时或不合适的内容,增加些新的内容,特别是增加一些有利于加强对学生素质教育的问题。据此我们对普通物理实验课的目标定为:

(1) 学习基本实验方法和操作技能,在观察、测量与分析中,加深对物理学的认识;

(2) 学习实验的物理思想,为用实验方法探索问题有一定的基本训练;

(3) 培养学生的思维能力,主要是分析问题、解决问题和提出问题的能力,增加学生的素质,以适应学生各种可能的发展方向。

修订内容大体是:A(综合实验)增加两个新题,其余部分也有一定的删改;B(设计实验)更换7个选题;C(计算机部分)全部6题都是结合计算机的实验。

修订工作的分工如下:

朱世国(四川大学):实验A(7*、8*、12*、13、14*、15*、16*)

乔　双(东北师范大学):绪论(§4、§5、§6),实验B(6、7、9、11),实验C(1、3、5、6)*;

马葭生,舒信隆(华东师范大学):实验A(1、2、5、6、10、11),实验B(1、8);

赵立竹(东北师范大学):绪论(§1、§2、§3),实验A(3、4、9),实验B(2、3、4、5、10、12、13、14、15);

胡险峰(四川大学):实验C-2*;

陈立宏(东北师范大学):实验C-4*;

徐立平(华东师范大学):参与实验A-10,B-8的修订工作。

修订后虽有改进,但是由于我们对问题的分析、研究不足,肯定有进一步探讨的问题,我们期待读者的批评指正。

编　者

2006年冬

---

* 研制出相关仪器。

目　　录

绪　论

§1　实验课与学生的实验修养

1. 实验课的重要性

我们学习物理学，要认识各种物理现象，要掌握物理现象形成与演变的规律，要了解各种实验方法.

物理实验可以真实地展现物理现象及其演变，对加强物理概念的理解，加深印象十分重要. 在实验课上，学生将亲自动手组成一测量系统，在观察、测量、记录与分析之后，得到被测量的具体量值及其变化规律，加强了对被测量的认识. 著名物理学家开尔文(Kelvin)曾讲："我常说，当你能把所讲的东西测量出来并用数字表示时，那么你对这个东西已有所认识. 但是如果不能用数字表示，那么你的认识是不够的，不能令人满意的，可能只是初步的认识，在你的思想上，还没有上升到科学的阶段，不论你所讲的是什么东西". ①

我们学习物理学不只是学习物理学理论，而且还要加以应用和发展，因此学习前人创造的实验方法就十分重要，因为掌握前人的实验方法并加以发展、创新，是促使物理学发展的重要条件.

2. 关注实验的物理思想

对于每一个物理实验，不仅应重视其原理、实验装置和数据处理方法等问题，更应着重了解其物理思想，这对于我们设计新的实验往往能提供很多启示和可借鉴之处. 特别留意如何将不可测量的物理量转换为可测的量；如何将测不准的量转换为比较能测准的量.

例如，在密立根油滴实验中，是利用一个小油滴的自由下落来求出其半径 r_i 的，然后再利用油滴在电场中的上升测量油滴上的电荷量 q_i，当测量了大量的不同量值的 q_i 之后，由统计、分析和计算将发现存在着最小的电荷.

3. 实验装置与仪器

使用一仪器必然要了解它的原理，作为一实验者还要了解设计的独创性之所在. 例如，测低电阻的双桥的创造性就在于它消除了导线电阻和接触电阻的

---

① 瑞斯尼克，哈里德. 物理学　第一卷　第一册. 李仲卿，等译. 北京：高等教育出版社，1965

影响,使低电阻的测量成为可能. 又如,测重力加速度的可倒摆,它解决了一般的物理摆等值摆长测量的精度不高的问题. 科学是面对未知世界的,为了探索新的问题,要改进旧仪器,要设计新仪器. 因此了解现有仪器的创造特点是十分重要的.

仪器的改进可以减小某些误差,但是不论设计如何精良,加工如何精细,都不可能制造出没有误差的仪器,因此在使用仪器时都会给测量引入误差. 测量时有必要考虑这种误差,一是采取适当的方法削减其误差的影响,二是将其误差的估计值作为测量不确定度的一部分去统计.

使用仪器在精度的选择上要适当,精度低将达不到测量的要求,精度过高则是浪费,因为在反复使用过程中仪器的精度必然降低.

使用仪器要充分发挥它的性能,一是要满足它的环境条件,二是要将其调节到正常使用状态. 为此,要了解什么是正常使用状态,怎样判断它是否达到正常使用状态. 天平、分光计和迈克耳孙干涉仪是很有代表性的仪器.

使用仪器时,要遵守仪器的操作规程,这是取得客观数据所必需的,也是保护仪器所必需的. 因此什么是仪器操作规程,为什么制定这样的操作规程,对于一位实验者在使用仪器之前就应该明确,如果不明确,就要查一下资料.

实验后,不要立即拆散测量系统,要对记录做初步分析,在不需要补测数据时才可结束. 实验结束时,仪器要恢复到使用前的状态,这是保护仪器的必要条件.

4. 及时发现问题

实验者一般都是细心安排实验的,实验的进程可能比较顺利,但是由于某种原因实验出现问题也是常见的,作为实验者应能及时发现问题,及时进行处理,防止精力与物资的浪费.

出现问题的原因是多方面的,如:理解上的偏差,仪器调节不到位,电路接错,参量取值不当,看错了现象,数错了数,实验装置有变动,等等.

实验时,要边观察现象,边审查数据,边思考分析,看看有否不正常的现象或数据,如果不假思索地埋头测量,那可能在实验结束了才发现测错了!

问题还有另一方面,就是对实验理解了,实验结果也不错,这时要提问会深入些. 如实验选题是否合适,目的、要求是否达到,内容取舍是否得当,学生兴趣如何,有否深入探索的问题,等等.

5. 关于实验记录与实验报告

实验要做记录是人所共知的,但是如何记录以及记录的价值如何对于学生来讲不一定都清楚.

记录是整理实验结果以及分析问题的依据,这要求记录的是原始数据,即从仪器上读出的未经任何运算的量值. 记录应做到日后自己能够看懂,别人也能

看懂的程度. 记录又是资料,它对日后的工作会有参考价值,因此记录应有固定的本子.

记录不仅记下实验数据,还应包括实验的环境条件,仪器的型号和编号,此外实验中遇到的问题、故障及可疑现象等也应如实记录.

对实验报告首先应明确,报告是工作的总结,是实验课学习的足迹,是日后可供参考的资料,而不仅是供教师评成绩的资料. 因此实验报告要对实验过程和结果有分析和评价,要有自己的思考,所以实验报告是实验课学习的重要组成部分.

6. 做实验的主人

实验课是在教师指导下的学习过程,但是学生在实验课上有较大的独立性,应当把教师的要求,变成自己的追求. 实验前应想一想,我应如何去做? 我期望什么结果? 实验后要评价自己的实验,要教师的评价,是为了增强自我评价的能力和信心. 要认真思考实验使自己想到了哪些问题. 总之,在实验过程中一定要动手又动脑,使自己的独立实验能力一步步提高.

要主动去做实验,就要深入地预习,而不是依赖教师的一般性介绍. 在预习时如能提出和教师要讨论的问题以及自己要探索的问题,并准备在实验中做些探索和分析,其作用将是巨大的.

§2 数据处理

一、测量结果及其标准偏差

1. 算术平均值

对某一物理量在同一条件(指实验方法、实验装置、计量器具、实验环境和操作人一定)下重复测量,由于各次测量的误差来源相同,称其为等精度测量. 设 n 次测量所得测量值为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$,其算术平均值 $\bar{x}$ 为

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i / n \qquad (0-2-1)$$

由于各测量值的随机误差正、负不定,求和过程的抵偿作用,算术平均值的误差的绝对值将随 n 的增加而减小,因而将算术平均值取为直接测量的最佳结果. 但是应注意测量值中如有坏数据,要在剔除后重新平均.

2. 标准偏差

一列测量值按下式计算可得测量列标准偏差 $s(x)$ 为

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \qquad (0-2-2)$$

而算术平均值实验标准偏差 $s(\bar{x})$ 则为

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \qquad (0-2-3)$$

一列测量值分散在较大的范围中，其标准偏差就大，若分散的范围较窄标准偏差就小，即标准偏差表征了测量值分散的情况. 在没有或可忽略系统误差的情况下，标准偏差是评价测量质量的依据. 如果认为测量值是高斯分布，则 $\bar{x}$ 的随机误差在$[-s(\bar{x}), +s(\bar{x})]$范围内的概率约为 2/3.

3. 可疑值的取舍

在一组测量值中，有的测量值可能偏大或偏小，如果没有确切的理由说明它是有粗差的测量值，就要依据统计规律对测量值的取舍进行判断. 在误差理论中对可疑值取舍的判据有几种，在此选用格拉布斯判据. 在该判据中给出对应不同 n 值的系数 G_n（表 0-2-1），而可以保留的测量值 x 的范围为

$$(\bar{x} - G_n \cdot s) \leq x \leq (\bar{x} + G_n \cdot s) \qquad (0-2-4)$$

式中 $\bar{x}$ 为算术平均值，s 为其实验标准差.

表 0-2-1 G_n 临界值 显著水平 $\alpha = 0.01$

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
G_n	1.16	1.49	1.35	1.94	2.10	2.22	2.32	2.41	2.48	2.55	2.61	2.66
n	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	30
G_n	2.70	2.75	2.78	2.82	2.85	2.88	2.91	2.94	2.96	2.99	3.01	3.10

4. 间接测量的结果

设 $y = y(x_1, x_2, \cdots, x_m)$，其中 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 测得后，可由此函数求出物理量 y 之值. 如果 $x_1, x_2, \cdots, x_m$ 各有 n 个测量值，则有两种计算 y 的方法.

（1）先平均法

先求各 x_i 的平均值，然后将它们代入函数求 y，即

$$y = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_m) \qquad (0-2-5)$$

（2）后平均法

分别从各 x_i 中取一值求 y_i，可得 n 个 y 值，再求 y_i 的平均值，即

$$\bar{y} = \frac{\Sigma y_i}{n} = \frac{\Sigma y(x_{1i}, x_{2i}, \cdots, x_{mi})}{n} \qquad (0-2-6)$$

对于线性函数，两方法计算结果是一致的，对于非线性函数，则有差异，但是一般差异较小. 而后平均法要求各 x 的测量次数相同，这很不方便，所以一般均用先平均法.

5. 标准偏差的传递与合成

设被测量 y 可以写成直接测量量 x_k 的函数：

$$y=f(x_k) \qquad (0-2-7)$$

首先写出误差 $\mathrm{d}y$ 的全微分表达式，即误差传递的代数和式：

$$\mathrm{d}y=\sum_k \frac{\partial f(x_k)}{\partial x_k}\mathrm{d}x_k \qquad (0-2-8)$$

式中 $\mathrm{d}x_k$ 是直接测量量 x_k 的误差，偏导数的绝对值用 c_k 表示：

$$c_k=\left|\frac{\partial f(x_k)}{\partial x_k}\right| \qquad (0-2-9)$$

c_k 称为灵敏系数，它表示 x_k 的误差或不确定度对结果误差或不确定度的影响系数.

进而可得标准偏差 s_y 的方和根合成式：

$$s_y=\sqrt{\sum_k (c_k s_{x_k})^2} \qquad (0-2-10)$$

各x_k 的误差互不相关时，式(0-2-10)形式的随机变量总体标准偏差合成是严密的. 由此公认(约定)：y 的标准不确定度合成形式同式(0-2-10)，也是各分量与灵敏系数之积的方和根.

二、测量不确定度

由于测量不可避免要有误差，所以用一测量结果作为被测量真值的估计值自然要有偏差，现在讨论的测量不确定度就是对测量结果 x 的偏差做全面的评估，就是对 x 的随机误差和系统误差全面综合地评定. 测量不确定度 U 是测量结果附近的量值范围($\bar{x}-U,\bar{x}+U$)，在此量值范围中可能涵盖被测量真值，显然测量不确定度的范围越窄，测量结果就越可靠.

1. 不确定度的来源

任何测量结果的不确定度均是几个不同来源的不确定度的综合效应，评定不确定度首先要明确它的不同来源. 实际上不确定度的来源可能有如下一些方面：

(1) 被测量的定义不完善；

(2) 相同条件下被测量在重复观测中的变化；

(3) 测量方法和测量程序的近似和假设；

(4) 复现被测量的方法不理想；

(5) 取样的代表性不够；

(6) 测量仪器的计量性能局限；

(7) 测量标准或标准物质的不确定度；

(8) 引用数据或其他参量的不确定度；

(9) 对主要环境条件等影响量的认识不当或测控不完善；

(10) 对模拟式仪器的读数有人为偏移.

分析测量不确定度要参考一些资料，要有经验，但重点是对实验有深入的了解.

2. 标准不确定度的评定

实验不确定度的来源可有多个，但评定不确定度的方法只有两种，即 A 类评定和 B 类评定. 当评定的不确定度表现为标准偏差时，称为标准不确定度.

(1) 标准不确定度的 A 类评定

由于各种偶然效应使重复测量的测量值分散开，标准偏差是这些测量值的统计值，它表现了测量值分散的情况，亦即表达了由于偶然效应引入的不确定度，这时的评定为 A 类评定，这也说明前述标准偏差是不确定度的一部分.

在重复性条件下对同一被测量多次测量结果的标准不确定度的 A 类评定 $u_A(x)$，就取算术平均的实验标准偏差 $s(\bar{x})$，即

$$u_A(x) = s(\bar{x}) = \sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2/(n(n-1))} \qquad (0-2-11)$$

(2) 标准不确定度的 B 类评定

由于系统效应引入的不确定度，它不影响数据的分散，不能用统计方法去计算，这时的不确定度评定为 B 类评定.

标准不确定度的 B 类评定，是参照有关资料（比如国家计量技术规范（代号 J J G）中有关资料）给出一极限值 Δ（Δ 有高置信概率），再由此极限值 Δ 除一系数 k，得出等价于标准偏差的标准不确定度 $u_B(x)$，即

$$u_B(x) = \Delta/k \qquad (0-2-12)$$

系数 k 的取值和分布有关，对于均匀分布则取 $k=\sqrt{3}$. 一般仪器基本误差引入的不确定度，不是均匀分布，但比较接近均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$. 在我们的实验中，一般可近似取 $k=\sqrt{3}$.

(3) 合成标准不确定度

测量结果的不确定度是各来源不确定度的综合效应，各来源标准不确定度的综合就称为合成标准不确定度 $u_c(x)$. 由于各来源的误差有正有负，所以标准不确定度的合成不能用简单的算术相加，而用公认（约定）的方和根法，即式(0-2-10)中实验标准偏差 $s(x)$ 改为标准不确定度 $u(x)$，并且合成时 A 类评定与 B 类评定等价，合成标准不确定度 $u_c(y)$ 为

$$u_c(y) = \sqrt{\Sigma\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \qquad (0-2-13)$$

如 $y = cx_1^{\alpha} \cdot x_2^{\beta} \cdots x_m^{\gamma}$ 可取

$$u_c(y)=\sqrt{\left[\left(\frac{1}{\alpha}\frac{u(x_1)}{x_1}\right)^2+\left(\frac{1}{\beta}\frac{u(x_2)}{x_2}\right)^2+\cdots\right]}$$

(4) 自由度

自由度是重复(或组合)测量时,计算实验标准偏差所用的独立残差的个数. 有 n 次测量时有 n 个 x_i 的残差 $v_i=x_i-\bar{x}$,由于 $\Sigma v_i=0$,所以独立残差为 $n-1$ 个,$s(x)$、$s(\bar{x})$的自由度 $\nu=n-1$. 即 A 类评定标准不确定度的自由度为 $n-1$. 已知不确定度 u 的相对不确定度 $\sigma(u)/u$ 与自由度 ν 有如下关系:

$$\sigma(u)/u=1/\sqrt{2\nu} \tag{0-2-14}$$

式中 $\sigma(u)$ 为不确定度 u 的标准偏差. 可见自由度 ν 越大,$\sigma(u)/u$ 越小,不确定度 u 越可靠.

对 B 类评定的自由度,可参照式(0-2-14)给出

$$\nu\approx\frac{1}{2}\left[\frac{\sigma(u)}{u}\right]^{-2} \tag{0-2-15}$$

根据经验,按照信息来源的可信程度来判断 $\sigma(u)/u$(给一百分比估计值),再按式(0-2-15)计算 ν,如估计 $\sigma(u)/u$ 为 0.20,则可取 $\nu=12$.

合成标准不确定度 $u_c(y)$ 的自由度称为有效自由度 ν_{eff},可由韦尔奇-萨特思韦特(Welch-Satterthwaite)公式计算:

$$\nu_{\text{eff}}=\frac{u_c^4(y)}{\sum\left\{\frac{\left[\frac{\partial y}{\partial x_i}u(x_i)\right]^4}{v_i}\right\}} \tag{0-2-16}$$

或当 $y=cx_1^{\alpha}\cdot x_2^{\beta}\cdots x_m$ 时,

$$\nu_{\text{eff}}=\frac{\left[\frac{u_c(y)}{y}\right]^4}{\frac{\left[\frac{u(x_1)}{\alpha\ x_1}\right]^4}{v(x_1)}+\frac{\left[\frac{u(x_2)}{\beta\ x_2}\right]^4}{v(x_2)}+\cdots}$$

三、最小二乘法与直线拟合(一元线性回归)

设物理量 x 与 y 之间是直线函数关系 $y=a+bx$,测出若干组 x、y 测量值 (x_i,y_i),利用这些测量值求出参数 a、b 的过程就是直线拟合. 最小二乘法是直线拟合的常用方法.

(1) 最小二乘原理

设 x、y 间存在 $y=a+bx$ 的函数关系,将各组测量值(x_i,y_i)标在直角坐标纸上,设 x_i 的误差对求参数 a、b 的影响远小于 y_i 的误差对它们的影响,图

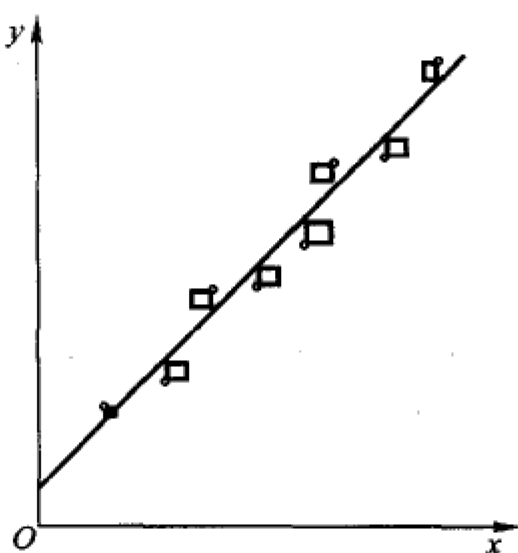


图 0-2-1

0-2-1 中的小四方形的面积表示 y_i 的残差 v_i 的平方 v_i^2.

最小二乘原理：能使残差的平方和 Σv_i^2 为极小的参数取值为参数的最佳值. 即图 0-2-1 中能使正方形面积总和为最小的直线为最佳直线.

(2) 正规方程组

由 n 组(x_i, y_i)测量值及 y_i 的残差 v_i 可写成(假设 x_i 的误差可忽略，y_i 为等精度测量)

$$\left.\begin{aligned} y_1 &= a + bx_1 + v_1 \\ y_2 &= a + bx_2 + v_2 \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_n &= a + bx_n + v_n \end{aligned}\right\} \quad (0-2-17)$$

变换上式，得

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= y_1 - (a + bx_1) \\ v_2 &= y_2 - (a + bx_2) \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots \\ v_n &= y_n - (a + bx_n) \end{aligned}\right\}$$

上列各式两侧平方后求和，得

$$\Sigma v_i^2 = \Sigma[y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (0-2-18)$$

按最小二乘原理，参数的最佳值当满足

$$\frac{\partial \Sigma v_i^2}{\partial \hat{a}} = 0, \quad \frac{\partial \Sigma v_i^2}{\partial \hat{b}} = 0 \quad (0-2-19)$$

即

$$\left.\begin{aligned} -2\Sigma[y_i - (\hat{a} + \hat{b}x_i)] &= 0 \\ -2\Sigma[y_i - (\hat{a} + \hat{b}x_i)]x_i &= 0 \end{aligned}\right\}$$

则

$$\left.\begin{aligned} \Sigma y_i &= n\hat{a} + \hat{b}\Sigma x_i \\ \Sigma x_i y_i &= \hat{a}\Sigma x_i + \hat{b}\Sigma x_i^2 \end{aligned}\right\} \quad (0-2-20)$$

上式称为 $y = a + bx$ 的正规方程组，解出 a、b 的最小二乘法结果为 $\hat{a}$、$\hat{b}$：

$$\left.\begin{aligned} \hat{a} &= \frac{\Sigma x_i^2 \Sigma y_i - \Sigma x_i \Sigma x_i y_i}{n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} \\ \hat{b} &= \frac{n\Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} \end{aligned}\right\} \quad (0-2-21)$$

又设

$$\left.\begin{aligned}s_{xx} &\equiv \Sigma(x_i-\bar{x})^2 = \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2/n \\ s_{yy} &\equiv \Sigma(y_i-\bar{y})^2 = \Sigma y_i^2 - (\Sigma y_i)^2/n \\ s_{xy} &\equiv \Sigma(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y}) = \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i/n\end{aligned}\right\} \quad (0-2-22)$$

则 $\hat{a}$、$\hat{b}$ 可表示为

$$\left.\begin{aligned}\hat{b} &= s_{xy}/s_{xx} \\ \hat{a} &= (\Sigma y_i - b\cdot\Sigma x_i)/n\end{aligned}\right\} \quad (0-2-23)$$

又进一步分析可得相关系数 $\hat{r}$ 为

$$\hat{r} = s_{xy}/\sqrt{s_{xx}\cdot s_{yy}} \quad (0-2-24)$$

在实验中时常要了解二量 x、y 间是否存在线性相关，对此相关系数 r 很重要. 如存在线性相关，对于 n 组 (x,y) 值必须 $|r| > r$(临界值)(表 0－2－2).

表 0－2－2　测量组数为 n 时 $|r|$ 的临界值　显著性水平 $\alpha = 0.05$

n	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
r(临界值)	0.997	0.950	0.878	0.812	0.754	0.707	0.666	0.632	0.576	0.532	0.497	0.468	0.444

$\hat{a}$、$\hat{b}$ 的标准偏差 s_a、s_b 为

$$\left.\begin{aligned}s_b &= \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}\,\frac{\hat{b}}{r} \\ s_a &= \sqrt{\frac{\Sigma x_i^2}{n}}\,s_b\end{aligned}\right\} \quad (0-2-25)$$

（3）非线性函数

对于非线性函数要进行坐标变换后成为直线函数，方可用以上的最小二乘法求解.

例：

$$\begin{aligned}
y = ax^b \quad &\rightarrow \quad (\ln y) = (\ln a) + b(\ln x) \\
y = ae^{bx} \quad &\quad\;\; (\ln y) = (\ln a) + b\cdot x \\
y = ae^{b/x} \quad &\quad\;\; (\ln y) = (\ln a) + b\left(\frac{1}{x}\right) \\
y = \frac{1}{a+be^{-x}} \quad &\quad\;\; \left(\frac{1}{y}\right) = a + b(e^{-x}) \\
y = ax + bx^2 \quad &\quad\;\; \left(\frac{y}{x}\right) = a + b\cdot x
\end{aligned}$$

严格讲，当 y 是等精度测量值时，变换后的量$\left(\text{如}\ln y, \frac{1}{y}\right)$将不是等精度的，这偏离了上述讨论中 y 为等精度的出发点. 因此所得截距和斜率不是十分理想的值. 准确计算要用加权最小二乘法.

例：$y = ax^b$

变换为 $$\ln y = \ln a + b\ln x$$

令 $$Y = \ln y, A = \ln a, X = \ln x$$

y 为等精度变量. Y 则不是. 因为

$$\sigma_Y^2 = \frac{1}{y_i^2}\sigma_y^2$$

取权 $w_i = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_Y^2} = y_i^2$

加权残差平方和 δ 为

$$\delta = \sum w_i(Y_i - A - bX_i)^2$$

按最小二乘法，应是

$$\frac{\partial\delta}{\partial A} = 0, \frac{\partial\delta}{\partial b} = 0$$

以下推导略.

四、经验公式

当 x、y 间的函数式 $y = y(x)$ 尚未知时，由 n 组测量值(x_i, y_i)探索得到的函数式为经验公式. 大体可按如下的步骤进行.

(1) 在坐标纸上绘出实验曲线；

(2) 当实验图线不是直线时，参照已知的函数曲线，拟定实验曲线的函数；

(3) 变换坐标，将实验曲线改为直线；

(4) 用最小二乘法求直线参数；

(5) 返回到原函数，即为经验公式；

(6) 和测量值比较修改经验公式.

五、测量结果的检验

由于测量过程均不可避免引入误差，即测量结果总是或多或少偏离约定真值 y_t（公认值、相对准确值）。测量结果的检验是审查测得值对约定真值的偏离是否超出测量误差的容许范围，在此讨论如何确定误差的容许范围. 现在一般取 $t_{0.95}(\nu) \cdot u_c(y)$ 为容许误差的最大值. t 因子 $t_{0.95}(\nu)$（其数值如表 0－2－3 所示）是自由度为 ν 的 t 分布的置信概率为 95% 的边界值，容许误差范围取为 $\pm t_{0.95}(\nu) \cdot u_c(y)$，即对测得值 y，要求

$$|y - y_t| \leq t_{0.95}(\nu) \cdot u_c(y)$$

就可认为 y 的测量误差在容许误差范围内. 但要注意这样定的误差范围不能严格讲是置信概率 95% 的范围，因为$(y - y_t)/u_c(y)$的分布不是 t 分布.

表 0-2-3 $t_{0.95}(\nu)$ 数值表

ν	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{0.95}(\nu)$	12.71	4.30	3.18	2.78	2.57	2.45	2.36	2.31	2.26	2.23
ν	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$t_{0.95}(\nu)$	2.20	2.18	2.16	2.14	2.13	2.12	2.11	2.10	2.09	2.09
ν	22	24	26	28	30	40	50	60	70	∞
$t_{0.95}(\nu)$	2.07	2.06	2.06	2.05	2.04	2.02	2.01	2.00	1.99	1.96

实验例：用双棱镜测钠黄光的波长 λ_D：

$$\lambda_D = \sqrt{d_1 d_2}\Delta x D$$

$\bar{d}_1 = 0.072\,2\ \text{cm}, u_A(d_1) = 0.000\,91\ \text{cm}, \nu_A(d_1) = 5$；

$\bar{d}_2 = 0.276\,4\ \text{cm}, u_A(d_2) = 0.003\,12\ \text{cm}, \nu_A(d_2) = 5$；

$\overline{\Delta x} = 0.031\,25\ \text{cm}, u_A(\Delta x) = 0.000\,09\ \text{cm}, \nu_A(\Delta x) = 5$；

$D = 74.01\ \text{cm}, u(D) = 0.2/\sqrt{3} = 0.11, \nu(D) = 8$（估计 $\sigma[u(D)]/u(D) = 0.3$）

$$\lambda_D = 5.964\,8\times10^{-5}\ \text{cm}, u_c(\lambda_D) = 0.054\times10^{-5}\ \text{cm}$$

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{[u_c(\lambda_D)/\lambda_D]^4}{\dfrac{[u(d_1)/2d_1]^4}{\nu(d_1)} + \dfrac{[u(d_2)/2d_2]^4}{\nu(d_2)} + \dfrac{[u(\Delta x)/\Delta x]^4}{\nu(\Delta x)} + \dfrac{[u(D)/D]^4}{\nu(D)}} = 12$$

查 $t_{0.95}(\nu)$ 表，$t_{0.95}(12) = 2.18$，$t_{0.95}(\nu)\cdot u_c(\lambda_D) = 0.12\times10^{-5}\ \text{cm}$

$$|\lambda_D - \lambda_S| = 0.072\times10^{-5}\ \text{cm} \quad (\lambda_S = 5.893\times10^{-5}\ \text{cm})$$

上述计算结果，$|\lambda_D - \lambda_S| < t_{0.95}(\nu)\cdot u_c(\lambda)$，可以认为 λ_D 与其公认值 λ_S 之差在容许误差范围内.

要补充说明一点，上述各分项不确定度主要评算的是各分项的 A 类标准不确定度，如计入 B 类不确定度. 合成标准不确定度当增大些，对检验更有利.

[注] 式(0-2-21)可以变换为

$$\left.\begin{aligned} \hat{a} &= \sum \frac{\sum x_i^2 - x_i \sum x_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} y_i \\ \hat{b} &= \sum \frac{n x_i - \sum x_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} y_i \end{aligned}\right\} \qquad (0-2-26)$$

参照误差传递公式(0-2-8)式，$\hat{a}$、$\hat{b}$ 的标准偏差 s_a、s_b 的平方与 y 的标准偏差 s_y 的平方间有如下关系（x_i 的误差可略去不计）：

$$\left.\begin{aligned} s_a^2 &= \Sigma\left[\frac{\Sigma x_i^2 - x_i\Sigma x_i}{n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}\right]^2 s_y^2 \\ s_b^2 &= \Sigma\left[\frac{nx_i - \Sigma x_i}{n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}\right]^2 s_y^2 \end{aligned}\right\} \qquad (0-2-27)$$

式中 $\Sigma[\quad]^2$ 展开后，可整理简化成

$$\left.\begin{aligned} s_a^2 &= \frac{\Sigma x_i^2}{n\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2} s_y^2 \\ s_b^2 &= \frac{1}{\Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2/n} s_y^2 \end{aligned}\right\} \qquad (0-2-28)$$

另外可以证明

$$s_y^2 = \frac{\Sigma(y_i - \tilde{y}_i)^2}{n-2} = \frac{1-r^2}{n-2} s_{yy} \qquad (0-2-29)$$

式中 $\tilde{y}_i = \hat{a} + \hat{b}x_i$.

将式(0－2－22)中的 s_{yy}，式(0－2－23)、式(0－2－24)和式(0－2－29)代入式(0－2－28)则得式(0－2－25).

§3 问题与分析

做一个实验得出要测量的结果，实验并没有结束，还应就实验的过程和结果，提出问题进行分析，这是创造性工作的需要，对于学生这是提高素质的锻炼.

1. 实验结果不理想

实验结果不理想是我们对实验结果的一个判断，也是提出了可以分析的一个问题的开端.

产生结果不理想的原因，可能是由于① 操作不当；② 仪器的准确度显著降低了；③ 实验方法不完善，等等.

当发现实验结果不理想，要仔细检查测量系统和记录，看是否操作不当造成的. 在严格审查之后重复测量，如果结果仍然不理想，那可能不是操作的问题.

仪器的运转如果正常，就要检查仪器的调节是否达到要求，如果怀疑仪器的准确度有问题，就要更换仪器或重新检定仪器.

例如，使用一新购入的油滴仪测量最小电荷，测量值都明显偏小，后来细致调节仪器，测量结果虽然稍有改善，但是仍不理想，这时怀疑仪器附属的电压表有问题. 检查结果，发现电压表的示值误差远大于该等级仪表规定的允许误差，在更换了电压表之后，实验结果就比较理想了.

实验方法不完善也是实验结果不理想的可能原因，在此举出几个实例说明.

实验例1　在水平气垫导轨上使质量相等的两个滑块进行弹性碰撞，用速度为 v_1 的滑块撞另一静止的滑块，认为质量相等相撞后速度应交换，测出 v_2 并用以说明动量守恒. 实验结果不理想，分析其原因之一是碰撞器的恢复系数 e 小于1，因此质量相等的二滑块相碰，也不能是速度交换.

改用质量 m_1 的滑块以速度 v_{11} 去撞另一静止的（$v_{21}=0$）质量 m_2 的滑块（$m_1>m_2$），碰撞后二者速度为 v_{22} 和 v_{12}. 用

$$m_1v_{11}=m_1v_{12}+m_2v_{22}$$

是否成立，去检验动量守恒定律.

实验结果还是不理想，分析其原因，可能有：

导轨平直度不佳；

滑块运动有粘性阻力；

难于保证 $v_{21}=0$；

非对心碰撞；

滑块相撞时，冲力较大，引起滑块振动.

针对上述问题对实验进行改进后，结果较理想. 设

$$c=(m_1v_{12}+m_2v_{22})/m_1v_{11}$$

19次实验的平均结果①，$\bar{c}=0.9999$，$s_{\bar{c}}=0.0008$

实验例2　将室温的铜棒放到液氮中，测量由于汽化液氮质量的变化，求液氮的汽化热. 实验结果往往误差较大，其原因主要是铜棒在液氮中释放的热量的计算上. 原方法是将液氮中的铜棒取出放到水量热器中，从水温的降低求铜棒的吸热量，再取铜棒在液氮中放出的热量等于此吸收热量去计算液氮的汽化热.

此实验误差较大的原因主要是，铜棒放到水中后，在铜棒周围要结冰，使水温不均匀.

后来将此实验交给学生重新设计，结果设计出许多实验结果比较理想的方案②.

上述的例子是关于系统误差的，下面介绍一个关于随机误差的实验例子.

实验例3　用迈克耳孙干涉仪测量钠光 D_1、D_2 的波长差 $\Delta\lambda$，由于光拍形成的干涉条纹模糊区范围较宽，测量二相邻模糊区的间隔 Δd 时，由于模糊区的中点很难确定，Δd 的测量误差较大，因而 $\Delta\lambda$ 的测量误差往往也较大. 由于光拍是周期现象，参照摆的周期的测量，从测量 n 个周期的时间去求一个周期可减小测量的随机误差. 在此可测多个模糊区的间隔，并且测量可以不用微动手轮而用

① 杨述武. 实验误差分析举例. 物理实验，1983，3(6)：283—286

② 潘元胜. 大学生在物理实验中所表现出的创造能力. 物理实验，1993，13(1)：1—3

粗动手轮,这样不仅容易操作,也比较省时间.

例如,测8个模糊区的间隔去求Δd,重复几次得

$$\overline{\Delta d}=0.2910\pm0.0003\ \text{mm}$$

波长差$\Delta\lambda$为

$$\Delta\lambda=\overline{\lambda}^2_{D_1,D_2}/(2\cdot\Delta d)=0.5967\pm0.0006\ \text{nm}$$

这是相当好的结果.

应当注意,实验结果不满意还有另一种可能,就是实验时的被测物和设想目的物不一致,这时的测量值和设想目的物的公认值自然是不一致的. 如果其差异未超过测量误差范围,则测量误差掩盖了其差异,当差异较大时,就出现了"实验结果不理想".

例如,一次测实验室铜棒的热导率,结果和铜的热导率公认值有显著差异,改进实验装置后没有大的改善,后经分析发现铜棒中有相当多的杂质.

2. 出现非预期的现象

出现非预期现象,如果是可重复的那就是有一定规律,若并非操作失误,就可能和仪器有关,例如:

在气垫导轨上测滑块的速度时,用I形挡光片测得的总比用U形挡光片测得的偏大;

用约利秤的弹簧做弹簧振子实验,当弹簧下的砝码加到一定值时,弹簧在上下振动的同时出现明显的左右摆动;

做凸透镜物像关系实验时,发现将亮的物体置于透镜物方焦点以内时,在另一侧也可得到实像;

双棱镜的干涉条纹的强度分布显著不均匀.

对这样的非预期现象,在结合理论分析和实验检验之后是可以明确其原因的,其实它是在一定条件下的必然现象,这种分析不仅加深了认识而且提高了解决问题的能力.

3. 深入探索的问题

实验之后,可以提出进一步思考、探索的问题很多,在此提出一些可供考虑的方面:

实验条件改变了将如何?

实验的不确定度能否再减小?

数据处理方法可否改变?

实验内容能否扩展,使实验更充实?

实验如何安排,学生可能更有兴趣?

实验可否重新设计?

新的设想、联想的问题,等等.

§4 计算机辅助实验

计算机在物理实验中的应用,即计算机辅助实验,已经引发了实验方法和技术的革新,越来越受到人们的重视. 计算机辅助实验包含了计算机软件、硬件方面的知识和技术,比较全面地反映出计算机综合应用的水平,是加强开发计算机应用的重要方向.

一、计算机辅助实验的内容

计算机辅助实验的内容包括三个方面:

(1) 实验数据的处理与分析.

(2) 实验数据的实时采集.

(3) 实验过程的监控及测试过程的自动化.

(4) 计算机虚拟实验,用于预习和探索实验条件.

二、接口

由于计算机只能接受和处理二进制数字信号,而物理过程和外部设备的信号形式比较复杂,因此必须在计算机和外部设备、物理过程之间设置一个缓冲电路来实现它们之间的信息传递. 该缓冲电路就称为接口.

在物理实验中,物理量多数都是模拟量.

1. 模拟接口

物理实验过程往往是产生一些连续变化的模拟量的过程,如温度、速度、压力、流量、光亮度等。由于计算机只能处理二进制数字量,因此必须将这些模拟量经过传感器,如光电元件、压敏元件、热敏元件等变成电信号,然后将此电信号经过放大、采集,再经过模数转换器(A/D)转换成数字量送入计算机处理. 对于控制过程来说,最终的目的是根据当时现场情况进行控制. 所以,计算机要去控制一个物理过程,就要把收集到的信息进行加工,将加工后的信息变成模拟量(D/A)送出,以达到控制的目的.

图 0-4-1 是一个实时测量与控制系统框图. 从微型机系统的角度来看,可分为输入和输出两个部分. 将输出部分去掉,那么就成了将现场模拟信号变为数字信号,并送入计算机进行处理的系统,这样的一个系统实际上就是一个测量系统. 另外一种情况下,如果将输入部分去掉,那么它就成了一个程序控制系统. 下面对图 0-4-1 中各部分加以简单介绍.

(1) 传感器

由于对信号采样并进行模数转换均是对电信号而言,因此,将非电信号转换

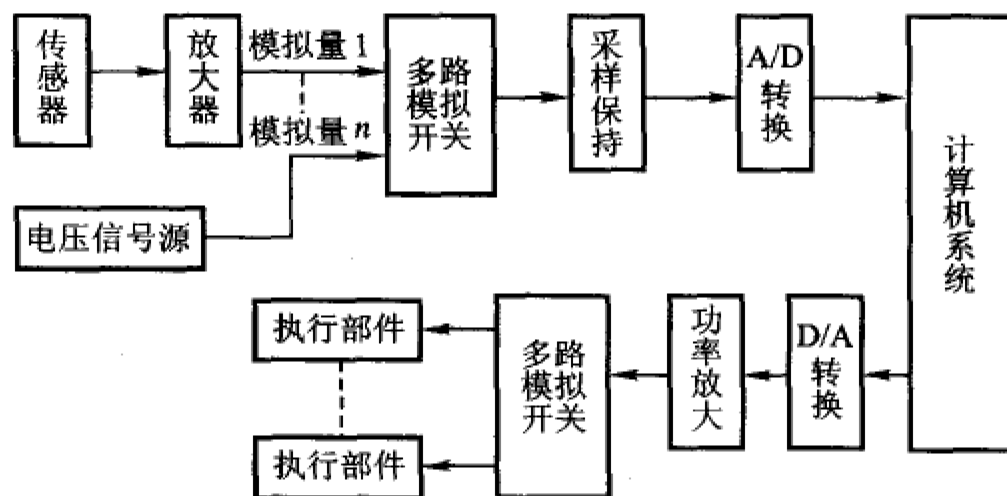


图0－4－1 计算机测控系统框图

成电信号就要采用相应的传感器．现在已有温度、压力、位移、速度、流量、液面、湿度、生理、辐射，直到光学、色谱、轴角、霍尔等各类传感器，而且使用不同材料、工艺、原理制作的传感器越来越多．传感器技术已成为一个专门的技术，它已不属于本书介绍的范围，有兴趣的读者可参看有关的专业书籍．

（2）信号放大器

传感器送出的信号往往很弱，并混有许多干扰信号，因此必须滤掉干扰，并将微弱信号放大到和A/D转换器相匹配的程度．这就需要配接高精度、高开环增益的运算放大器，或具有高共模抑制比的测量放大器．有时信号源与计算机两者电平不同或者不能共地，这时就需要进行电的隔离（即要用隔离放大器）．

（3）多通道模拟开关

当需要对多个信号源进行分时采样，为了能共用一个采样保持器、一个A/D转换器，这时需要使用多通道模拟开关（或称多路模拟开关）．通过微机控制，分时地用模拟开关来接通不同的信号源．进行采样，A/D转换，送入计算机处理．如果需要将处理的结果变成模拟量输出，还需使用D/A转换．有时控制对象是多个，因而也需将一路D/A输出，并分时送给多个对象，这时也需要一到多通道模拟开关．

（4）采样保持器

要对高速度变化的信号进行瞬时采样，但由于A/D转换需要一定的时间，这时采样的值可能不等A/D转换结束就已经改变了，因此，必须把瞬时的采样值保存下来，直到转换完为止，然后，用下次采样的值来更新，这就需要采样保持器．

（5）A/D转换器

采样后的信号，要进行量化，转换成计算机能接受的数字量，这个任务由A/D转换器来完成．

(6) D/A 转换器

将数字量变成模拟量输出，即进行 D/A 转换.

(7) 功率放大器

由 D/A 转换器给出的模拟输出信号的驱动能力有时不能达到执行机构的要求，这就要求设置一级功放以增强其驱动能力.

2. 数字接口

在有些实验中会遇到将电接点通断信号、逻辑电压信号以及脉冲量信号送入计算机，或者相反由计算机向外设、物理过程送出这些信号的情况. 通常把这些开关量、数字代码及脉冲量归并为数字量. 实现数字量在计算机和外部设备、物理实验过程之间进行传递的缓冲电路，称为数字接口.

三、计算机辅助实验的具体形式

1. 计算机辅助实验教学

主要用计算机软件来帮助学生做好预习、思考问题和对一些较难调节的仪器、装置或较难做好的实验给予启发和提示.

2. 对实验数据的处理和分析

在物理实验中，对实验数据的处理和分析是必不可少的. 有一些处理比较复杂，手工计算很困难，改用计算机辅助来做就容易得多，充分显示出其优越性，这也是今后科学实验中所采用的方式. 在基础物理实验阶段，主要应用计算机辅助来作函数曲线的拟合、插值、不确定度计算和图表的制作.

3. 模拟实验

在物理实验中，有一些验证性实验对测量精确度要求比较高，采用仪表测量难于达到要求. 还有一些实验是对过程或现象进行研究的，使用仪器装置无法做到或缺陷较多. 对这一类使用仪器难以做到或效果不好的实验，可采用计算机模拟实验的办法来解决.

4. 辅助测量和过程监控

在保持原有实验中的原理和基本方法不变的情况下，仅改用计算机来控制测量过程，自动采集数据，并对数据进行分析处理. 计算机还可以根据测量结果对实验加以控制. 这是开发智能型实验仪器的基础.

§5 基于 ISA 总线的 8 位 A/D、D/A 接口简介

一、计算机系统的结构

目前，由单 CPU 构成的计算机系统都采用总线型结构. 其结构框图如图

0－5－1所示．其中 CPU 又称微处理器，是运算控制中心，也是整个系统的核心硬件．计算机的工作过程就是 CPU 根据指令来进行调度和操作，从而完成各种任务；存贮器用来存放程序和数据及运算的中间结果和最终结果．I/O 接口又称输入/输出接口，它是 CPU 或者说计算机与外部设备实现信息传递的缓冲电路，是连接 CPU 与外部设备的桥梁和纽带；外部设备是指与计算机或者说 CPU 传递信息的仪器、装置、对象或过程．

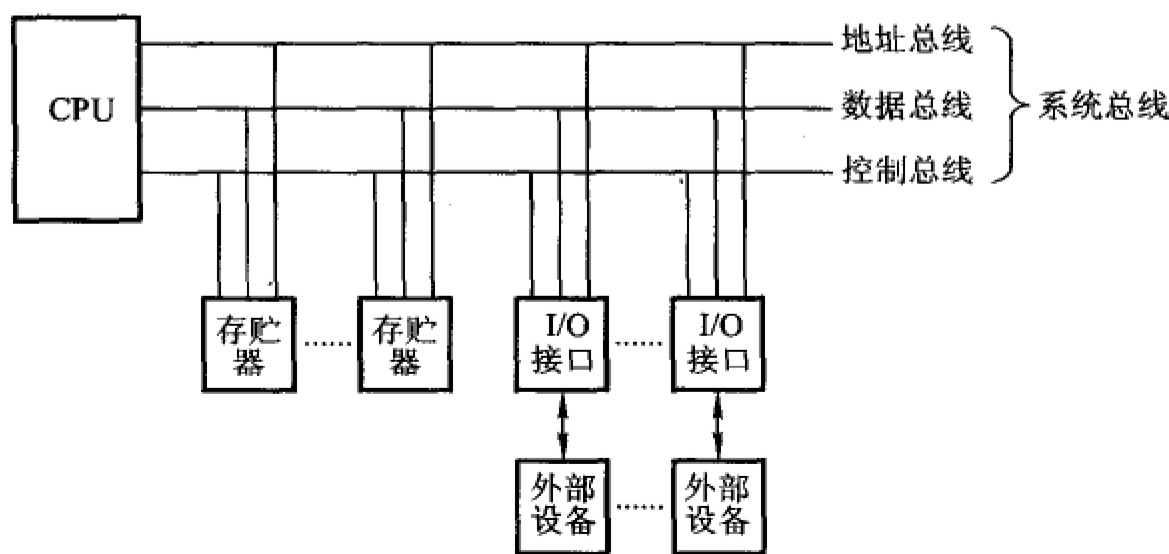


图 0－5－1

二、I/O 接口的基本功能

由上可知，I/O 接口是计算机和外部设备实现信息传递的窗口．由于计算机是一个比较复杂的大规模数字逻辑电路，因此它只能接收、识别和处理二进制信息．而外部设备可接收和发出的信息形式几乎都不符合计算机的要求．据此，I/O 接口应该完成的主要任务是：将计算机传送给外部设备的二进制信息转换成外部设备可接收的形式；将外部设备发出的信息转换成计算机能够接收的二进制形式．I/O 接口的基本功能包括如下几个方面：

1．地址译码

计算机与不同的外设传递信息是通过不同的地址来区分的，因此在接口电路中应有地址译码部分，用以确定外部设备的地址．

2．信息寄存

由于计算机的工作速度非常快，外部设备很难跟上．这样计算机传送给外部设备的信息，应能在接口电路中寄存下来，传送给外设．反过来，外部设备传送给计算机的信息也要能够在接口电路中寄存下来，以备计算机读取．

3．信息转换

由于计算机和外部设备所能接收和传送的信息形式不同，接口电路必须完

成两方面信息的转换工作，包括信息的格式、电平、码制转换等.

4. 功率驱动

由于外部设备接收的信号往往需要具备一定的功率才能驱动，而计算机总线带负载的能力有限，因此，在接口电路中应有功率放大部分.

三、计算机和外部设备传递数据的方式

计算机和外部设备传递数据或者说信息的方式有如下四种：

1. 无条件数据传递方式

在这种方式中计算机"主观"认为外部设备已经准备好，从而不经过任何判定，直接与外部设备传递数据. 因此，为了使数据传递准确、可靠，在编程时应考虑必要的软件延时，以保证外部设备准备就绪.

2. 有条件数据传递方式(即查询方式)

在这种方式中计算机在与外部设备正式传递数据之前，要读取外部设备的状态信息，判定外部设备是否准备好. 若准备好，则传递数据；否则继续判定.

3. 中断方式

在这种方式中，计算机允许外部设备请求中断，外部设备准备好就会向计算机发出中断请求，计算机一旦接到中断请求，便会立即中断当前程序的执行，转去执行相应的中断服务子程序，从而完成与外部设备的数据传递，中断服务完成后计算机会返回被中断程序继续执行.

4. DMA 方式即直接存贮器存取方式

在这种方式中，外设向 DMA 控制器提出传递数据的申请，然后 DMA 控制器向计算机中的 CPU 提出接管系统总线的请求，待 CPU 允许后，CPU 会自动让出其对系统总线的控制权，转交给 DMA 控制器. 在 DMA 控制器的控制下实现外设与计算机内存之间的直接数据传递. 显然，该方式适合计算机与外设快速传递批量数据的场合.

在上述四种方式中，2、3 两种方式最为常用.

四、A/D、D/A 转换器的原理和特性

A/D、D/A 转换器是计算机或说 CPU 与外部世界相联系的模拟量输入输出通道. 其工作原理和特性分别叙述如下：

1. D/A 转换器

(1) D/A 转换器的原理和特性

D/A 转换器是能够把输入数字量转换成与此数值成正比的电压或电流的器件. 这里我们以常用的 T 型解码网络 D/A 转换器为例来介绍. 图 0 - 5 - 2 是 T 型解码网络 D/A 转换器的原理图. 电路中全部电阻仅有 R 和 $2R$ 两种，整个

电路由相同的电路环节组成. 每节有两个电阻、一个开关,开关相当于二进制代码的一位,受该位代码控制. 用 8 位二进制数

$$(B)_2 = (D_7\ D_6\ D_5\ D_4\ D_3\ D_2\ D_1\ D_0)_2$$

来控制并表示这些开关状态,则有

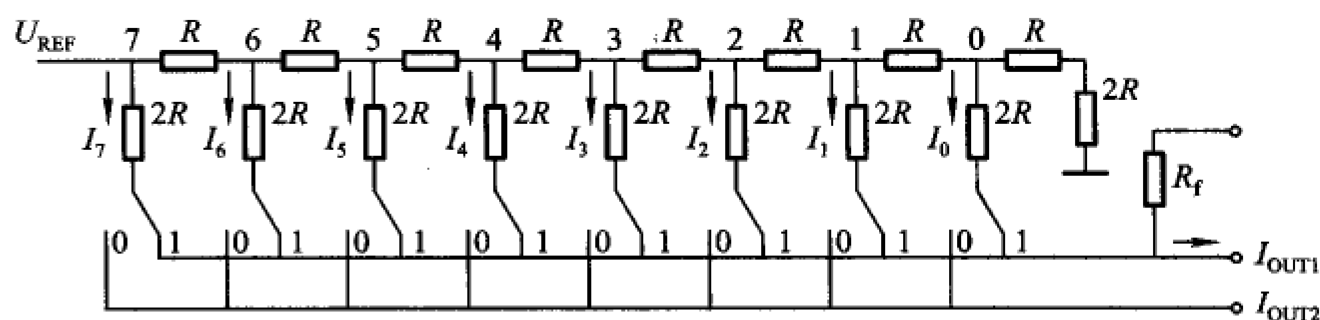


图 0-5-2

$$I_{OUT1} \propto B$$

其中 $B = D_7 \times 2^7 + D_6 \times 2^6 + \cdots + D_0 \times 2^0$,为二进制数$(B)_2$ 的十进制数值. 同理,有 $I_{OUT2} \propto \overline{B}$,且 $I_{OUT1} + I_{OUT2}$ = 常量.

可见,经图 0-5-2 转换后,产生了与输入二进制代码数值成正比的电流 I_{OUT1},实现了 D/A 转换.

(2) D/A 转换器的性能指标

① 分辨率. 这是最主要的性能指标. 它定义为基准 U_{REF}与 2^n 之比. 其中 n 为输入数字量的位数.

② 精度. 精度是指 D/A 转换器的实际输出与理论值的最大偏差. 包括 D/A 转换器的线性误差、零点误差、增益误差和温度漂移等误差的总和. 它有两种表示方法,一种是绝对精度,常用 LSB 为单位表示,如 $\pm\frac{1}{2}$LSB, ±1LSB;另一种是相对精度,用相对于满度输出值的百分数来表示,如相对精度为 ±0.1%.

③ 稳定时间. 指数字量由全 0 变成全 1 或全 1 变成全 0 时,模拟量输出达到离终值相差 $\pm\frac{1}{2}$LSB 时所需的时间.

④ 线性误差. 理想的 D/A 转换器输入输出特性应当是线性的. 在满刻度范围内,偏离理想转换特性的最大误差称为线性误差. 该误差也以最低有效位 LSB 为单位来表示.

2. A/D 转换器

(1) A/D 转换器的原理和特性

A/D 转换器是能够把输入模拟量转换成与此数值成正比的数字量的器件. 这里我们以常用的逐次逼近型的 A/D 转换器为例来介绍. 图 0-5-3 是逐次逼

近型 A/D 转换器的原理图. 其工作原理如下:将一待转换的模拟输入信号 U_i 与一个推测信号 U_1 相比较,根据推测信号大于还是小于输入信号来决定增大还是减小该推测信号,以便向模拟输入信号逼近. 推测信号由 D/A 转换器的输出获得,当推测信号与模拟信号相等时,向 D/A 转换器输入的数字就是对应模拟输入量的数字量. 其"推测"值的计算方法如下:使二进制移位寄存器的每一位从最高位起依次置 1,每置 1 次"1"就比较一下其 D/A 输出与 X_{IN} 的大小,若 $U_1 > X_{IN}$,则该位的"1"清成"0",否则保留"1",直至最末一位比较完为止.

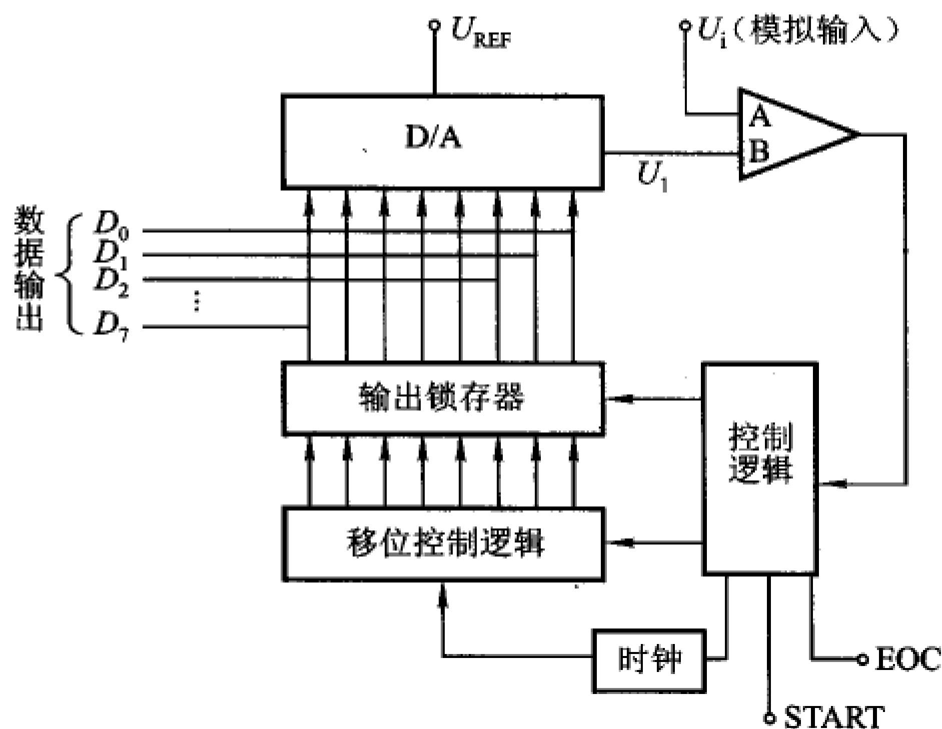


图 0-5-3

(2) A/D 转换器的性能指标

① 分辨率与量化误差. 通常把 A/D 转换器所能分辨的模拟输入信号的最小变化量称为该 A/D 转换器的分辨率,常用其数字量位数来表示. 例如 10 位 A/D 转换器,其分辨率为 10 位. 用相对精度来表示则为$\frac{1}{2^{10}}\times 100\% \approx 0.1\%$.

量化误差和分辨率是一致的,它是由于用有限的数字对模拟量进行量化而引起的误差. 所以量化误差理论上为 $\pm\frac{1}{2}$LSB. 显然,提高分辨率即可减小量化误差.

② 精度. 指 A/D 转换器的实际输出与理论输出之差,它是 A/D 转换器各种误差的总和. 有的产品也以分项误差的指标给出. 精度常以 LSB 为单位来表示,有时也以相对误差表示. 例如 ADC0816 的不可调整总误差 $\leqslant \pm\frac{1}{2}$LSB,

ADC1143 的线性误差≤ ±0.06%.

③ 转换时间. 指 A/D 转换器完成一次转换所需的最大时间,有时也用转换时间的倒数即转换速率来表示.

3. ADC0809、DAC0832 与 IBM－PC 机的接口及应用

(1) 8 位 A/D 转换器芯片 ADC0809

ADC0809 是带有 8 路输入模拟开关,其电平与 TTL 兼容,逐位逼近式的采用 CMOS 材料的 8 位 A/D 转换器,其转换时间在标准时钟 640 kHz 时为 100 μs. 图 0－5－4 是 ADC0809 的原理框图及引脚. 其中各引脚功能如下:

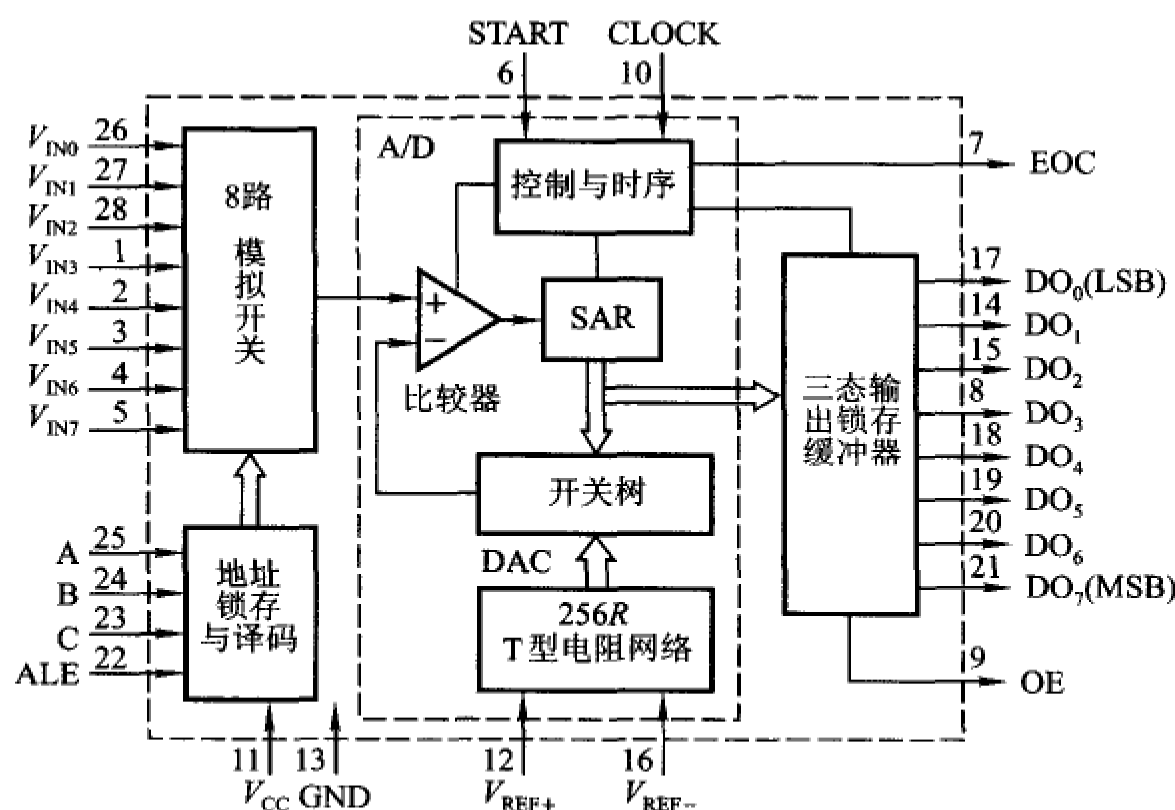


图 0－5－4　ADC0809 的原理框图及引脚

表 0－5－1　ADC0809 输入真值表

地址线			选择输入
C	B	A	
0	0	0	V_{IN0}
0	0	1	V_{IN1}
0	1	0	V_{IN2}
0	1	1	V_{IN3}
1	0	0	V_{IN4}
1	0	1	V_{IN5}
1	1	0	V_{IN6}
1	1	1	V_{IN7}

① $V_{IN0}\sim V_{IN7}$:8 路模拟量输入端.

② A、B、C:模拟量通道选通端,其地址译码与选通关系见表0-5-1.

③ ALE:地址锁存允许信号端. 高电平有效,当 ALE 为上升沿时,将 A、B、C 地址信号锁存,按地址译码,将对应通道的模拟量输入给 A/D 转换器. 要求信号宽度为 100~200 ns.

④ START:启动转换信号. 输入,高电平有效. 要求信号宽度为 100~200 ns,上升沿将 START 清零,下降沿开始 A/D 转换.

⑤ CLOCK:实时时钟. 标准频率为 640 kHz.

⑥ EOC:转换结果信号. 输出,高电平有效. 在 A/D 转换期间为低电平,一旦转换结束就变为高电平. 此信号可用作向 CPU 的中断申请,或供 CPU 查询 A/D 转换是否结束.

⑦ $DO_0\sim DO_7$:A/D 转换结果输出,三态输出锁存.

⑧ OE:允许输出信号. 输入,高电平有效. 当它有效时,才能将锁存在缓冲器中的转换结果 $DO_0\sim DO_7$ 输出.

⑨ V_{REF+}、V_{REF-}:参考电压端子. 用来提供 D/A 转换器权电阻的标准电平. 一般 $V_{REF+}=5$ V,$V_{REF-}=0$ V.

⑩ V_{CC}:电源电压,+5 V.

⑪ GND:接地端.

(2) 8 位 D/A 转换器芯片 DAC0832

DAC0832 是采用 20 引脚双列直插式封装的 CMOS 芯片. 图 0-5-5 是它的引脚图,图 0-5-6 是它的内部原理框图.

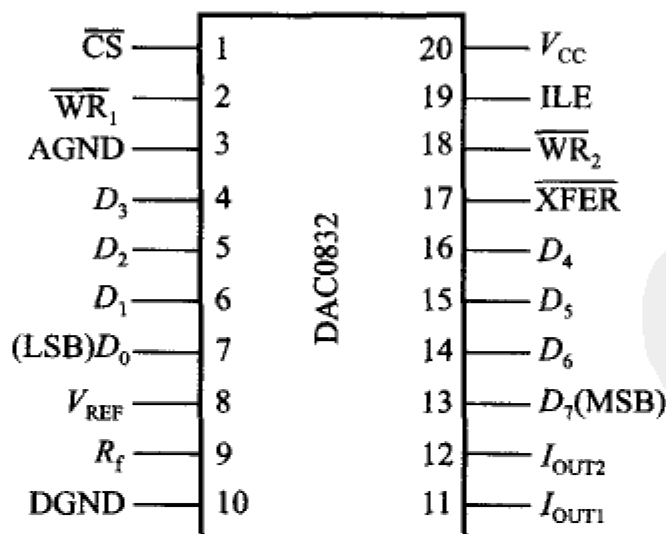


图 0-5-5 双列直插式 DAC0832 引脚图

DAC0832 主要由输入寄存器、DAC 寄存器和一个 8 位 D/A 转换器组成. 使用两个寄存器的好处是可以进行两次缓冲操作,使器件的使用具有更大的灵

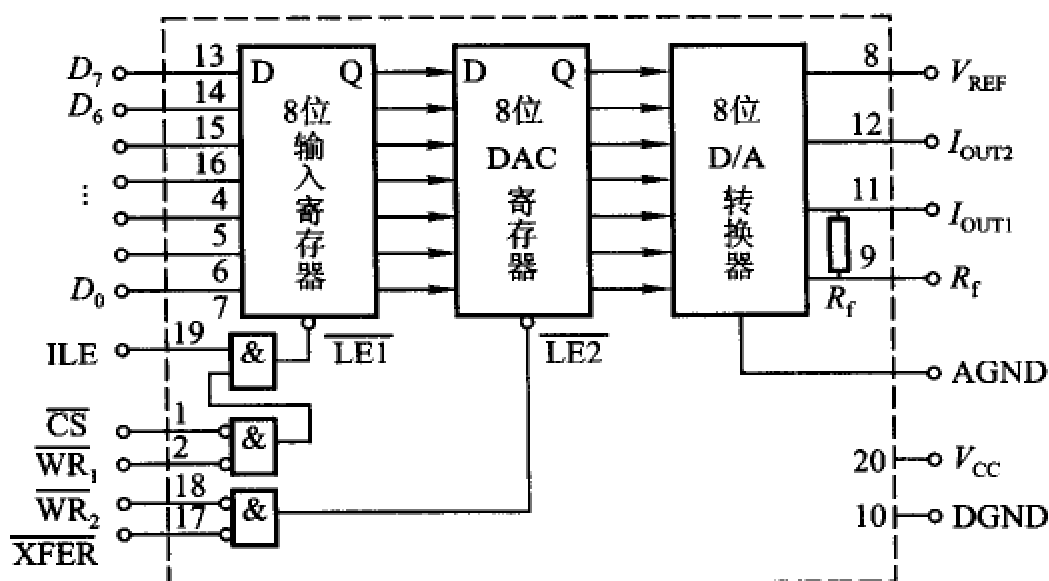


图 0－5－6 DAC0832 原理框图

活性.

DAC0832 各引脚定义为：$\overline{CS}$与输入寄存器允许信号 ILE 合起来可对写信号 $\overline{WR}_1$ 是否起作用进行控制. $\overline{WR}_1$ 写信号用以控制 8 位要转换的数字量 D_7 D_6… D_0 输入并锁存于 DAC0832 的输入寄存器中，$\overline{WR}_2$ 写信号与传送控制信号$\overline{XFER}$同时有效时，将输入寄存器中的数字量传送到 8 位 D/A 寄存器中锁存起来. 这时 8 位 D/A 转换器就开始工作. I_{OUT1}和 I_{OUT2}为输出电流，其中 I_{OUT1}在 D/A 寄存器内容全为 1 时输出电流最大，当 D/A 寄存器内容为全 0 时输出电流为 0. I_{OUT2}为一常数与 I_{OUT1}之差，即 $I_{OUT1}+I_{OUT2}=$常数. AGND 和 DGND 分别为模拟量地和数字量地，它们要连在一起共地. V_{REF}是基准电压，为了提高转换精度，要求 V_{REF}精度尽可能高一些. V_{CC}是电源电压，允许范围为 +5 V 到 +15 V. R_f 为片内反馈电阻，它可以作为外部运算放大器的反馈电阻，所以 R_f 引脚可直接接运算放大器的输出端.

8 位 D/A 转换器可以满足一般工程要求的精度，所以用得最多. 例如，对于最大行程范围对应控制信号 0～10 mA 控制电流的电动执行器，其启动电流（即控制死区）通常为 150 μA. 如果这样的电动执行器用 8 位 D/A 转换器控制，数字量的全 0 到全 1 对应模拟量输出的 0～10 mA，则最低有效位提供 $10\ mA/2^8=10\ mA/256\approx40\ \mu A$ 的电流变化，即数字量变化了近 4 个数码才能驱动执行器的变化，所以选 8 位的 D/A 转换芯片可满足控制精度的要求.

在要求精度更高的场合，如果 8 位的 D/A 转换器不能满足要求，就要采用 10 位或 12 位的 D/A 转换器.

（3）ADC0809、DAC0832 与 IBM－PC 机接口电路原理图

如图 0－5－7 所示，为 8 位 A/D、D/A 接口卡的原理图. 本接口卡的使用说明：

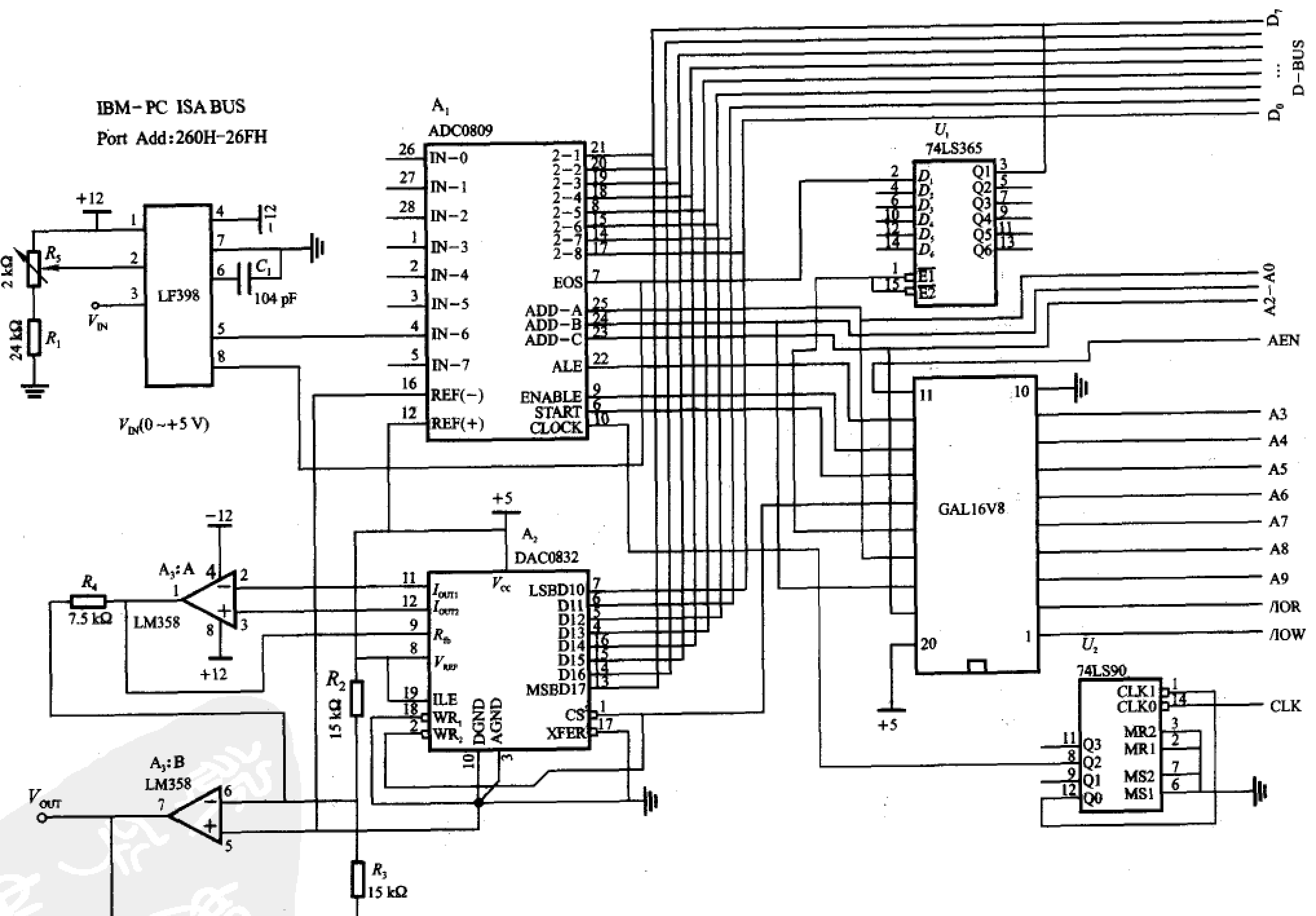


图 0-5-7 8 位 A/D、D/A 接口卡原理图

a. 读口地址 320 H ~ 327 H,选通相应的模拟通道 IN_0 ~ IN_7;

b. 写口地址 330 H,为启动 A/D 转换;

c. 读口地址 330 H,并判断其最高位 D_7 是否由 0 变为 1,若是则读 A/D 转换结果,否则等待;

d. 读口地址 328 H,即读出 A/D 转换结果;

e. 写口地址 320 H,即进行 D/A 转换.

§6 流行总线性能比较

总线的标准多种多样,选择哪一种标准,完全取决于用户的实际应用需要,没有任何强制性。表 0-6-1 列出了当今流行总线的性能比较,仅供读者参考。

表 0-6-1 流行总线性能比较

总线类型	适用机型	工业标准	总线宽度 /bit	总线工作速率 /MHz	最大传输速率 /(MB·s^{-1})
PC/XT	80X86 Pentium 系列	PC/XT	8	4	4
ISA	80X86 Pentium 系列	Industry Standard Architecture	16	8	16
STD	Z-80, V20, V40, IBM 系列 PC	STD bus	8	2	2
PCI	Pentium 系列 PC, PowerPC, Alpha 工作站	Peripheral Component Interconnect	32 或 64	33	132 或 264
SCSI	Pentium 系列 PC, 工作站和小型机	Small Computer System Interface	16 或 32	5	10 ~ 20
IEEE1394	Pentium 系列 PC, 工作站	FireWire		100 ~ 400	100 ~ 400 Mb/s
USB2.0	Pentium 系列 PC	Universal Serial Bus		12 ~ 480	12 ~ 480 Mb/s
AGP	Pentium 系列 PC	Accelerated Graphics Port	64	66 以上	264 或更高
IEEE488	仪器接口	IEEE488.2	8	1.5	1.5

A. 综合性实验

实验 A-1 用实验方法寻求弹簧振子振动周期的经验公式

用实验方法求相关物理量之间的经验公式是科研及生产实践中经常要解决的问题. 在这类问题中,一般会遇到如下两种情况:① 已知相关物理量之间的函数关系形式,要求通过实测的实验数据,确定该函数关系式中某些未知的参数值;② 函数关系式未知,在此情况下,就要根据实验测量数据,绘制相关量之间的图线,并结合理论分析和判断,采用适当的几种函数形式进行试探拟合,从中决定最佳的拟合关系式.

目的

本实验通过寻求弹簧振子振动周期经验公式这一典型的实际问题的训练,学习通过实验寻求经验公式的一般方法和掌握相应的数学工具,即优化法和多元线性回归.

仪器和用具

焦利秤、吊钩和砝码组、物理天平、四根不同质量和劲度系数的弹簧、可调放大倍数的直流放大器(放大倍数可达到 1 000 倍)、BHR-8 型荷重传感器①、带 12 位 A/D 卡的 286 计算机、支架及荷重传感器固定座、带光电门的数字式计时器(例如 VAFN 型多用数字测试仪).

原理

在自身质量为 m_s 的弹簧下悬挂一质量为 m 的重锤即构成一弹簧振子. 由

① BHR-8 型荷重传感器由上海华东电子仪器厂生产.

初步半定量的测试，可确定该弹簧振子的周期 T 和下列因素有关：① 弹簧的劲度系数 k；② 重锤的质量 m；③ 弹簧自身的质量 m_s. 初步可假定其间的函数关系式为

$$T = Ak^{\alpha}(m + Bm_s)^{\beta} \quad \text{(A-1-1)}$$

式中 A、α、β、B 为四个待定常数，B 可理解为弹簧自身质量对于振子质量的折合系数. 本实验要求，根据实验室提供的不同的 k、m、m_s 组合所测得的相应的周期的实验数据，用实验方法求得待定的四个常数的值，从而确定公式(A-1-1)的具体形式. 实验方案、具体的测量步骤及结果的分析处理由同学独立完成.

用多元回归的方法求(A-1-1)式中待定常数的方法简述如下：首先把式(A-1-1)转化成线性函数的形式，对式(A-1-1)两边取对数，得

$$\lg T = \alpha \lg k + \beta \lg (m + Bm_s) + \lg A \quad \text{(A-1-2)}$$

令：$y = \lg T$；$a_0 = \alpha$；$x_0 = \lg k$；$a_1 = \beta$；$x_1 = \lg (m + Bm_s)$；

$$a_2 = \lg A \quad \text{(A-1-3)}$$

则式(A-1-2)可写成

$$y = a_0 x_0 + a_1 x_1 + a_2 \quad \text{(A-1-4)}$$

的形式，该式即为多元线性方程式，推广成更一般的形式为

$$y = a_0 x_0 + a_1 x_1 + \cdots + a_{m-1} x_{m-1} + a_m \quad \text{(A-1-5)}$$

为求得各待定常数，实验中，可以分别改变弹簧的劲度系数 k，重锤的质量 m 及弹簧的自身质量 m_s，测得相应的周期 T(弹簧应为用同一钢丝、同一模式、同一工艺加工的不同长度的弹簧). 设共改变 n 次，就得 n 组观测数据，若其中第 i 次观测数据的值分别为 k_i，m_i，m_{si} 及 T_i，代入公式(A-1-3)求得相应的 x_{0i}，x_{1i} 及 y_i. 根据 n 组观测数据，可得 n 组 x_{0i}，x_{1i}，y_i($i = 0, 1, \cdots, n-1$)，用多元回归的方法，即可求出各待定常数，基本方法如下.

取各次测量残差的平方和作为目标函数 Q，则

$$Q = \sum_{i=0}^{n-1} [y_i - (a_0 x_{0i} + a_1 x_{1i} + a_2)]^2 \quad \text{(A-1-6)}$$

根据最小二乘原理，各参数取最佳值的条件为该目标函数 Q 取极小值，所以，a_0，a_1，a_2 为最佳值的条件是：目标函数 Q 对 a_0，a_1 及 a_2 的一阶导数等于零，二阶导数大于零，即

$$\frac{\partial Q}{\partial a_0} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial a_1} = 0; \quad \frac{\partial Q}{\partial a_2} = 0 \quad \text{(A-1-7)}$$

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial a_0^2} > 0; \quad \frac{\partial^2 Q}{\partial a_1^2} > 0; \quad \frac{\partial^2 Q}{\partial a_2^2} > 0 \quad \text{(A-1-8)}$$

由式（A－1－7），整理后即可得 a_0,a_1,a_2 为最佳值所必须满足的方程组，常称正规方程组，采用乔里斯基（Cholesky）分解法解该正规方程组[1]，即可求出各待定常数 $\hat{a}_0,\hat{a}_1$ 及 $\hat{a}_2$. 详见附注.

由以上的讨论可知，采用多元线性回归方法求待定常数，进而确定公式时，不需要对实验条件提出特殊性的限制要求，实验中参数 k,m,m_s 可以自由选择，因而，本方法在寻求经验公式中更具一般性. 但是，在前面的讨论中，还没有解决求解弹簧自身质量的当量折合系数 B 的问题，因在求解方程（A－1－4）时，x_1 的值是作为已知值代入的，但在 x_1 的表达式

$$x_1 = \lg(m + Bm_s) \qquad (A-1-9)$$

中，却包含了未知的待定系数 B，因而，只有首先决定 B 后，x_2 才能作为已知值代入. 直接用分析法求解 B 是困难的，因为它在对数表达式中. 为此，可采用优化法，用数值计算法来求 B 及其他三个系数 α、β、A.

优化法的基本思想可归结为寻求所选目标函数的极值问题. 这里，仍选各次测量值残差的平方和 Q 作为目标函数，显然，该目标函数是各待定系数的函数，即

$$Q = Q(A,\alpha,\beta,B) \qquad (A-1-10)$$

用数值计算法求 B，必须首先确定 B 取值的可能范围，并把该范围定为 B 的搜索区间，例如$[\xi_0,\eta_0]$，其中 ξ_0 为搜索区间的起点，η_0 为终点. 该区间的大小可从理论分析或问题的物理意义来确定. 例如，弹簧本身质量的当量修正系数取值范围为[0,0.5]，所以 B 的搜索区间为[0,0.5]. 要在该区间确定 B 的最佳值，可采用如下的两种搜索方法.

1. 定步长搜索法

首先令 B 取 ξ_0 值，这样方程（A－1－4）中的 x_{0i}、x_{1i}及 y_i $(i=0,1,2,\cdots,n-1)$ 都已知，用多元线性回归求得回归系数 A_1、α_1、β_1 的值，计算出目标函数的相应值，得 $Q=Q_1(A_1,\alpha_1,\beta_1,\xi_0)$. 然后，$B$ 的取值增加一步长 s，即 $B=\xi_0+s$，步长 s 的大小可以根据精度要求确定. 再次用多元线性回归求出 A_2、α_2、β_2 的值，计算目标函数 $Q=Q_2(A_2,\alpha_2,\beta_2,\xi_0+s)$，然后，比较 Q_1 和 Q_2. 若 $Q_2<Q_1$，则令 $A_0=A_2,\alpha_0=\alpha_2,\beta_0=\beta_2,B=\xi_0+s$. 然后取 $B=\xi_0+2s$，求待定系数 A_3、α_3、β_3，及目标函数 Q_3，和原保留的目标函数比较，取其中小的一个，以此类推，即可求得使目标函数为极小值的待定系数的最佳值. 下面仅以框图的形式介绍用计算机进行数值计算的运算过程. 计算框图如图 A－1－1 所示.

在用定步长搜索时，若搜索范围为[0,0.5]，步长取 0.01，则要通过 50 次循环计算才能求得结果，因而计算的时间较长. 为缩短实验数据的处理时间，可采用黄金分割法计算.

2. 黄金分割法[2]

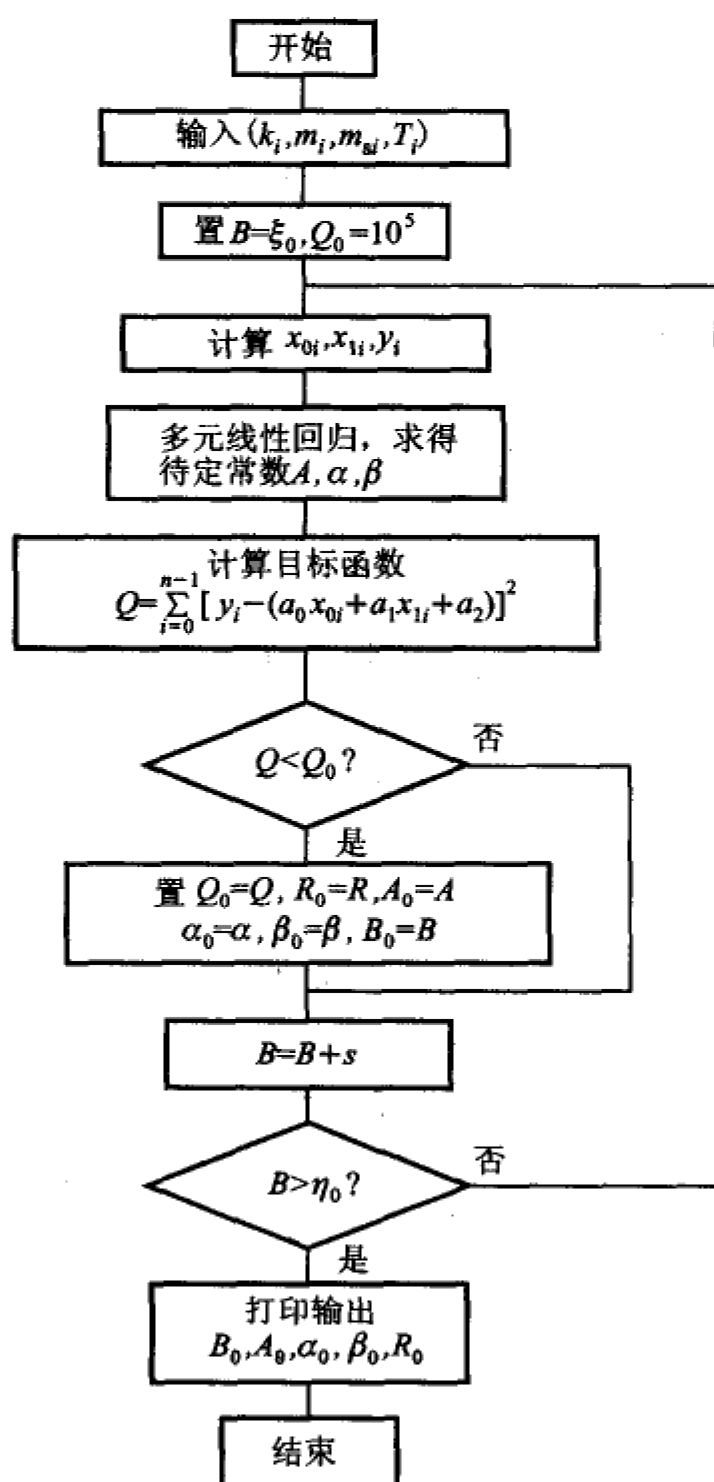


图 A－1－1

设搜索区间为$[\xi_0, \eta_0]$，然后按黄金分割法求出区间中的两点：

$$c_0 = \xi_0 + 0.382(\eta_0 - \xi_0)$$

$$d_0 = \xi_0 + 0.618(\eta_0 - \xi_0) \qquad (A-1-11)$$

显然

$$\xi_0 < c_0 < d_0 < \eta_0$$

计算中，B 取 c_0 及 d_0 值时，求得相应的目标函数 $Q(c_0)$及 $Q(d_0)$，比较两者的大小，并按如下的原则取值：

$$\left.\begin{aligned}&\text{若 } Q(c_0)>Q(d_0)\text{，则取 } \xi_1=c_0,\eta_1=\eta_0\\&\qquad\qquad c_1=d_0,d_1=\xi_1+0.618(\eta_1-\xi_1)\\&\text{若 } Q(c_0)\leqslant Q(d_0)\text{，则取 } \xi_1=\xi_0,\eta_1=d_0\\&\qquad\qquad c_1=\xi_1+0.382(\eta_1-\xi_1)\\&\qquad\qquad d_1=c_0\end{aligned}\right\}\tag{A-1-12}$$

这样，经过第一次搜索，包含最优点的搜索区间缩小为$[\xi_1,\eta_1]$，该区间的长度为

$$\eta_1-\xi_1=0.618(\eta_0-\xi_0)$$

然后，比较区间$[\xi_1,\eta_1]$上新的两点 c_1 和 d_1 的目标函数，把搜索区间进一步缩小到满足预定精度为止．根据计算实践，采用黄金分割法搜索，其计算时间比前述方法大大缩短．

用上述方法寻求弹簧振子周期经验公式时，为取得较理想的实验结果，关键是要保证各直接测量量达到较高的精度．弹簧劲度系数的测定可采用静态悬挂重物的方法，用焦利秤测量．质量根据所需精度选用相应的仪器．周期测量可采用光电门用 VAFN 多用数字仪测量．但由于弹簧下悬挂吊钩和砝码组成振子振动时，往往很难保证重力的作用线和悬点在同一垂线上，以致振子在上下振动的同时，还在垂直于振动方向的平面内转动，系于砝码钩上的挡光片就难免碰到光电门而导致测量的失败．本实验周期的测量希望同学根据实验 B－1所介绍的荷重传感器，把弹簧振动时弹性力的周期性变化转化为荷重传感器输出电信号的周期性变化．该信号经过放大后，可用 VAFN 多用数字测试仪测周期，或直接经 A/D 转换后，用计算机进行数据的采集，其测试装置和测试步骤均由同学自己拟定和调试．若用计算机进行数据采集，可看提供的 A/D 变换资料[3]．

实验内容

1. 用静态法测各弹簧的劲度系数，测量精度及数据处理方法由同学拟订．

2. 根据需达到的精度选用仪器测弹簧的质量．

3. 根据所选用的测周期的方法，选择合适的仪器，进行组装、调试和完善，获得不同组合下的周期测量结果．

4. 编写计算程序，求弹簧振子的周期经验方式，并和理论推导的简化公式即 $T=2\pi\sqrt{\dfrac{m+\frac{1}{3}m_s}{k}}$ 比较．

5. 写出实验总结报告．

分析与问题

对此实验的结果与理论的差异是测量误差还是理论问题？如果求出各系数的不确定度，是否有利于判断？你认为此实验或理论有否进一步探索的问题？

[附注]

设随机变量 y 及 m 个自变量 $x_0,x_1,\cdots,x_{m-1}$. 给定 n 组观测数据$(x_{0i},x_{1i},\cdots,x_{m-1,i},y_i)(i=0,1,\cdots,n-1)$，用线性表达式

$$y=a_0x_0+a_1x_1+\cdots+a_{m-1}x_{m-1}+a_m$$

对观测数据进行回归分析，其中 $a_0,a_1,\cdots,a_{m-1},a_m$ 为回归系数.

根据最小二乘原理，为使

$$Q=\sum_{i=0}^{n-1}[y_i-(a_0x_{0i}+a_1x_{1i}+\cdots+a_{m-1}x_{m-1,i}+a_m)]^2$$

达到最小，回归系数 $a_0,a_1,\cdots,a_{m-1},a_m$ 应满足下列方程组：

$$(CC^{\mathrm{T}})\begin{bmatrix}a_0\\a_1\\\vdots\\a_{m-1}\\a_m\end{bmatrix}=C\begin{bmatrix}y_0\\y_1\\\vdots\\y_{n-2}\\y_{n-1}\end{bmatrix},\text{则}\begin{bmatrix}a_0\\a_1\\\vdots\\a_{m-1}\\a_m\end{bmatrix}=(CC^{\mathrm{T}})^{-1}C\begin{bmatrix}y_0\\y_1\\\vdots\\y_{n-2}\\y_{n-1}\end{bmatrix}$$

其中

$$C=\begin{bmatrix}x_{00}&x_{01}&\cdots&x_{0,n-1}\\x_{10}&x_{11}&\cdots&x_{1,n-1}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\x_{m-1,0}&x_{m-1,1}&\cdots&x_{m-1,n-1}\\1&1&\cdots&1\end{bmatrix}$$

可采用乔里斯基(Cholesky)分解法解出回归系数.

函数名称：void isqt2(x,y,m,n,a,dt,v)本函数要调用乔里斯基法求解线性方程组的函数 achol. 本函数中的形参说明如下：

x——双精度实型二维数据，体积为 $m\times n$，每一列存放 m 个自变量的一组观测值，即$(x_{0i},x_{1i},x_{m-1,i})^{\mathrm{T}},i=0,1,\cdots,n-1$.

y——双精度实型一维数组，长度为 n. 存放随机变量 y 的 n 个观测值.

m——整型变量. 自变量个数.

n——整型变量.观测数组的组数.

a——双精度实型一维数组,长度为 $m+1$. 为回归系数 $a_0, a_1, \cdots, a_{m-1}, a_m$.

dt——双精度实型一维数组,长度为 4. 是反映一些回归效果的量.

v——双精度实型一维数组,长度为 m. 是 m 个自变量的偏相关系数.

用于多元线性回归的函数子程序 isqt2 如下:(文件名 isqt2.c)

严格讲式(A-1-3)中取 $y = \lg T$,这样 T 为等精度变量值,而 y 则不是,应当用加权最小二乘法处理.[参见绪论 §2　三(3)].由于 T 值变化不大,在此近似用等精度处理.

```
#include"math.h"
#include"stdlib.h"
void isqt2(x,y,m,n,a,dt,v)
int m,n;
double x[],y[],a[],dt[],v[];
{ int i,j,k,l,mm;
  double q,e,u,p,yy,s,r,pp,*b;
  extern int achol();
  b=malloc((m+1)*(m+1)*sizeof(double));
  mm=m+1;
  b[mm*mm-1]=n;
  for(j=0;j<=m-1;j++)
    { p=0.0;
      for(i=0;i<=n-1;i++)
        p=p+x[j*n+i];
      b[m*mm+j]=p;
      b[j*mm+m]=p;
    }
  for(i=0;i<=m-1;i++)
    for(j=i;j<=m-1;j++)
      {p=0.0;
        for(k=0;k<=n-1;k++)
          p=p+x[i*n+k]*x[j*n+k];
        b[j*mm+i]=p;
        b[i*mm+j]=p;
      }
  a[m]=0.0;
```

```
for(i=0;i<=n-1;i++)
  a[m]=a[m]+y[i];
for(i=0;i<=m-1;i++)
  {a[i]=0.0;
    for(j=0;j<=n-1;j++)
      a[i]=a[i]+x[i*n+j]*y[j];
  }
achol(b,mm,1,a);
yy=0.0;
for(i=0;i<=n-1;i++)
  yy=yy+y[i]/n;
q=0.0;e=0.0;u=0.0;
for(i=0;i<=n-1;i++)
  {p=a[m];
    for(j=0;j<=m-1;j++)
      p=p+a[j]*x[j*n+i];
    q=q+(y[i]-p)*(y[i]-p);
    e=e+(y[i]-yy)*(y[i]-yy);
    u=u+(yy-p)*(yy-p);
  }
s=sqrt(q/n);
r=sqrt(1.0-q/e);
for(j=0;j<=m-1;j++)
  {p=0.0;
    for(i=0;i<=n-1;i++)
      {pp=a[m];
        for(k=0;k<=m-1;k++)
          if(k!=j)pp=pp+a[k]*x[k*n+i];
        p=p+(y[i]-pp)*(y[i]-pp);
      }
    v[j]=sqrt(1.0-q/p);
  }
dt[0]=q;dt[1]=s;dt[2]=r;dt[3]=u;
free(b);return;
}
```

乔里斯基法求解线性代数方程组的函数子程序如下:(文件名 achol.c)

```
#include"math.h"
#include"stdio.h"
int achol(a,n,m,d)
int n,m;
double a[],d[];
{int i,j,k,u,v;
  if((a[0]+1.0==1.0)||(a[0]<0.0))
    {printf("fail\n");return(-2);}
  a[0]=sqrt(a[0]);
  for(j=1;j<=n-1;j++)a[j]=a[j]/a[0];
  for(i=1;i<=n-1;i++)
    {u=i*n+i;
      for(j=1;j<=i;j++)
        {v=(j-1)*n+i;
          a[u]=a[u]-a[v]*a[v];
        }
      if((a[u]+1.0==1.0)||(a[u]<0.0))
        {printf("fail\n");return(-2);}
      a[u]=sqrt(a[u]);
      if(i!=(n-1))
        {for(j=i+1;j<=n-1;j++)
            {v=i*n+j;
              for(k=1;k<=i;k++)
                a[v]=a[v]-a[(k-1)*n+i]*a[(k-1)*n+j];
              a[v]=a[v]/a[u];
            }
        }
    }
for(j=0;j<=m-1;j++)
    {d[j]=d[j]/a[0];
      for(i=1;i<=n-1;i++)
        {u=i*n+i;v=i*m+j;
          for(k=1;k<=i;k++)
            d[v]=d[v]-a[(k-1)*n+i]*d[(k-1)*m+j];
```

```
              d[v] = d[v]/a[u];
            }
        }
    for(j = 0;j <= m - 1;j++)
        {u = (n - 1) * m + j;
          d[u] = d[u]/a[n * n - 1];
          for(k = n - 1;k >= 1;k--)
            {u = (k - 1) * m + j;
              for(i = k;i <= n - 1;i++)
                {v = (k - 1) * n + i;
                  d[u] = d[u] - a[v] * d[i * m + j];
                }
              v = (k - 1) * n + k - 1;
              d[u] = d[u]/a[v];
            }
        }
      return(2);
    }
```

调用 isqt2 函数子程序的主函数示例如下:(程序中包含了文件 isqt2.c 和 achol.c)

```
#include"stdio.h"
#include"isqt2.c"
#include"achol.c"
main()
{int i;
  double a[4],v[3],dt[4];
  static double x[3][5] = {{1.1,1.0,1.2,1.1,0.9},
        {2.0,2.0,1.8,1.9,2.1},{3.2,3.2,3.0,2.9,2.9}};
  static double y[5] = {10.1,10.2,10.0,10.1,10.0};
  isqt2(x,y,3,5,a,dt,v);
  printf("\n");
  for(i = 0;i <= 3;i++)
    printf("a(%2d) = %e\n",i,a[i]);
  printf("\n");
  printf("q = %e   s = %e   r = %e\n",dt[0],dt[1],dt[2]);
```

```
    printf("\n");
    for(i=0;i<=2;i++)
        printf("v(%2d)=%e\n",i,v[i]);
    printf("\n");
    printf("u=%e\n",dt[3]);
    printf("\n");
}
```

参考文献

[1] 徐士良.常用算法程序集.2版.北京:清华大学出版社,1996:233—236

[2] 马葭生,等.普通物理选题实验50例.上海:华东师范大学出版社,1992:11

[3] 郝鸿安.常用模拟集成电路应用手册.北京:人民邮电出版社,1991:290—291

实验 A－2　气垫导轨实验中系统误差的分析与补正

目的

实验中,由于系统误差的存在,必然影响测量结果的精确性,特别是当随机误差较小时,系统误差就成为影响测量精确度的主要因素.历史上,一些物理常量精确度的提高,往往得益于系统误差的发现和补正.因此,制订实验方案时,如何发现和消除系统误差就特别重要.但系统误差的处理不像随机误差那样有完整的理论和方法,需要根据具体情况采取不同的处理方法.在某种意义上说,有赖于实验者的实验素质、实际经验的积累和巧妙的实验技巧.本实验通过对存在于气垫导轨实验中的系统误差的分析处理实例,学习分析发现并对系统误差进行修正的方法.

仪器和用具

气垫导轨、滑块、条形及U形挡光片、光电门、数字毫秒计或VAFN－多用数字测定仪、垫块若干、米尺、游标卡尺及固定游标卡尺的支座(游标卡尺设有游

标的微动螺丝).

原理

气垫导轨是目前力学实验中一种较精密的仪器,在气垫导轨实验中,由于气垫对滑块产生的漂浮作用,避免了容易引起实验误差的滑动摩擦力的影响;另一方面,在计时上又采用了光电计时的方法,使时间测量达到很高的精度. 照此,气垫实验理应得到更高的精确度. 但事实上,如果实验方法不合理,或者没有对实验过程中的系统误差作适当的补正,则这些系统误差也将在气垫导轨这种灵敏的仪器上反映出来,造成实验结果不理想. 因此,深入分析气垫导轨实验中系统误差的来源和修正的方法成为气垫导轨实验中十分重要的问题. 下面分别讨论气垫导轨实验中常见的几种系统误差及修正方法.

1. 粘性内摩擦阻力所引起的系统误差

滑块在导轨上运动时,虽然没有滑动摩擦阻力,但要受到粘性内摩擦阻力的作用,从而对滑块的运动产生一定的影响,造成附加的速度损失. 可以证明,当滑块的速度不是很大时,单纯在粘性内摩擦阻力作用下,其相应的速度损失 Δv 为①

$$\Delta v = -\frac{b}{m}s \qquad (A-2-1)$$

式中,b 为粘性阻尼系数,可按实验 A－5 提供的方法测量,m 为滑块的质量,s 为滑块运动所经过的距离.

在一般的气垫导轨实验中,粘性内摩擦力所引起的速度损失造成的系统误差对结果的影响和具体实验参数的选择有关,举例说明如下:

设导轨的粘性阻尼系数 $b=3.0\ \text{g/s}$,滑块的质量 $m=235.0\ \text{g}$,则当滑块运动的距离分别为 10.0 cm 和 100.0 cm 时,速度损失分别为

$$s=10.0\ \text{cm},\qquad \Delta v=\frac{3.0\times10.0}{235.0}\ \text{cm/s}=0.13\ \text{cm/s}$$

$$s=100.0\ \text{cm},\qquad \Delta v=\frac{3.0\times100.0}{235.0}\ \text{cm/s}=1.3\ \text{cm/s}$$

又如果滑块的实测速度为 $v=10.0\ \text{cm/s}$ 时,在以上两个不同距离时速度损失所占的百分比分别为 1.3% 和 13%,后者就非修正不可. 另外,在实验安排中,如使滑块速度增大到 50.0 cm/s,则相应的百分比降为 0.26% 和 2.6%. 从本实例可知,在实验中为了避免和减少粘性速度损失所引起的系统误差,在不增加其他

① 见实验 A－5 公式(A－5－7)的推导.

误差的前提下，适当缩短距离和选用较大的速度是有利的. 例如，在水平导轨上进行碰撞实验时，应尽可能缩短滑块自碰撞点到测速点之间的距离，并适当选用较大的碰撞速度. 如果碰撞点到测速点的距离较大，则应加以修正.

在倾斜导轨测重力加速度的实验中，对粘性内摩擦力所引起的系统误差修正就更复杂些. 如图 A－2－1 所示，滑块的运动方程为

$$ma = mg\sin\theta - bv \qquad (\text{A}-2-2)$$

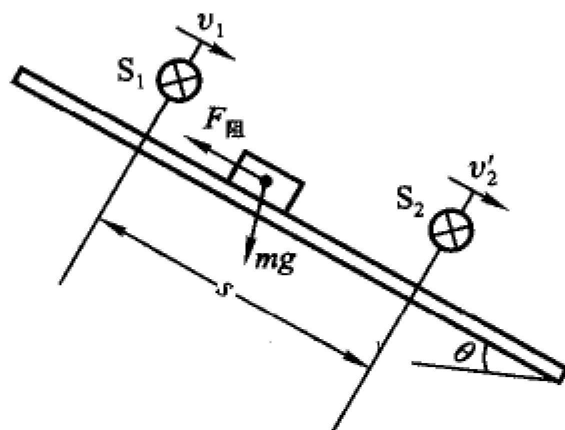


图 A－2－1

当存在粘性内摩擦力作用时，实测滑块经过光电开关 S_1 及 S_2 的速度为 v_1 及 v_2'（v_2' 中同时包含有速度损失及因滑块从 S_1 运动到 S_2 所用的时间 t_{12}'的变化所带来的影响），t_{12}'为有粘性内摩擦力的情况下，滑块从 S_1 到 S_2 的时间，它要比无阻尼力时长. 对式（A－2－2）作变换并积分：

$$\int_{v_1}^{v_2'} \mathrm{d}v = \int_0^{t_{12}'} g\sin\theta \mathrm{d}t - \int_0^s \frac{b}{m}\mathrm{d}s \qquad (\text{A}-2-3)$$

$$v_2' - v_1 = g\sin\theta t_{12}' - \frac{b}{m}s \qquad (\text{A}-2-4)$$

$$\frac{v_2' - v_1}{t_{12}'} = g\sin\theta - \frac{b}{m}\bar{v} \qquad (\text{A}-2-5)$$

上式中，$\frac{v_2' - v_1}{t_{12}'}$为有粘性内摩擦力后测得的加速度，用 a'表示，$g\sin\theta$ 为没有粘性内摩擦力时，理论加速度值，即重力加速度沿斜面方向的分加速度，用 a 表示，最后一项的量纲为加速度的量纲，可看作粘性内摩擦力所引起的附加加速度，用 $a_阻$ 表示，而 $\bar{v}$ 为滑块从 S_1 到 S_2 的平均速度，$\bar{v} = \frac{s}{t_{12}'}$. 因此，在倾斜导轨测重力加速度的实验中，考虑到粘性内摩擦力的影响后，对实测加速度 a'应作如下的修正，即

$$a_{理} = a' + \frac{b\bar{v}}{m} \qquad (A-2-6)$$

2. 测量中用平均速度代替瞬时速度所引起的系统误差

如果不考虑粘性内摩擦阻力的影响,用下式

$$a = \frac{v_B - v_A}{t_{AB}} \qquad (A-2-7)$$

测滑块沿斜面下滑的加速度. 公式(A-2-7)中,v_B、v_A 均是瞬时速度,而 t_{AB}则是相应于该两瞬时的时间间隔. 但在气垫导轨实验中,所测的 v_A 和 v_B 均是某段时间间隔内的平均速度,因而代入公式(A-2-7)计算加速度时,就存在系统误差. 我们用图 A-2-2 来说明问题,设以滑块开始运动作为计时起点,则 t_A 和 t_B 分别表示置于滑块上中间开槽的挡光片的前沿到达光电开关的时间,而 Δt_A 和 Δt_B 分别表示宽度为 Δs 的挡光片经过光电开关 A 和 B 时挡光的时间. 由公式 $v_A = \frac{\Delta s}{\Delta t_A}$ 及 $v_B = \frac{\Delta s}{\Delta t_B}$ 所计算的速度是滑块在 t_A 到 $t_A + \Delta t_A$ 及 t_B 到 $t_B + \Delta t_B$ 时间内的平均速度,不能看作 A 点和 B 点的瞬时速度. 考虑到匀加速运动的性质,v_A 和 v_B 应分别是 $t_A + \frac{\Delta t_A}{2}$ 及 $t_B + \frac{\Delta t_B}{2}$ 时刻的瞬时速度,而该两瞬时相应的时间间隔为 $\left(t_B + \frac{\Delta t_B}{2}\right) - \left(t_A + \frac{\Delta t_A}{2}\right) = t_{AB} - \frac{\Delta t_A}{2} + \frac{\Delta t_B}{2}$,因而式(A-2-7)应修正为

$$a = \frac{\Delta s}{t_{AB} - \frac{\Delta t_A}{2} + \frac{\Delta t_B}{2}}\left(\frac{1}{\Delta t_B} - \frac{1}{\Delta t_A}\right) \qquad (A-2-8)$$

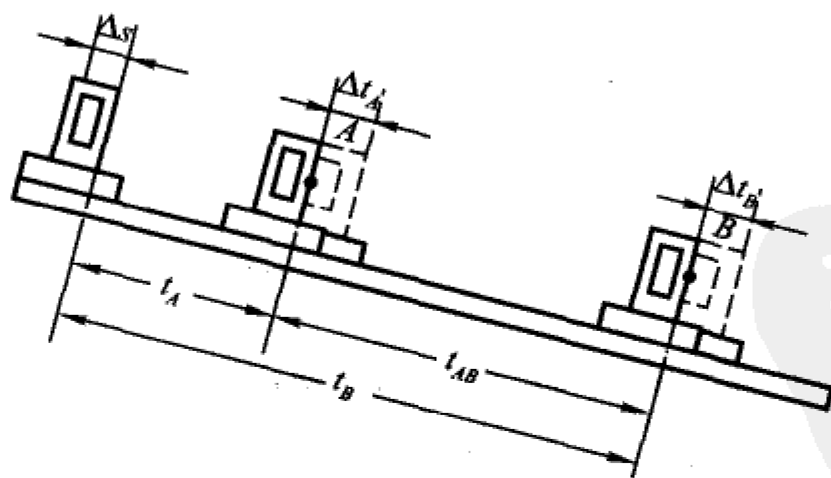


图 A-2-2

3. 条形挡光片引入计时中的系统误差

留给学生去探索(比较两种挡光片的测量值;慢慢移动挡光片,观察计时器

的动作）.

实验内容

1. 将气轨调成水平是气轨实验的基本操作，由于气轨本身均有一定的弯曲，因此将整个气轨调成水平是不可能的. 所谓“调平”是指将气轨上的某两点调到同一水平线上，一般是将二光电开关所在处调平.

用动态法调平是较好的方法，它是从观测滑块通过光电开关的时间去判断，设想应如何判断是否调平？

要注意滑块总要受到粘性阻力的作用.

2. 在调平导轨上测粘性阻尼系数 b，自己拟订方案.

3. 用倾斜气轨测重力加速度时，实验之初导轨未调平将引入系统误差，设计一可防止此项系统误差的测量方案.

4. 在倾斜气轨上测滑块加速度 a 和导轨的倾角 θ，按前述对 a 进行补正后求 g 及不确定度 u_g，和当地重力加速度公认值 g_0 进行比较，评价此实验结果.

5. 条形挡光片引入计时中的系统误差的分析

气轨实验中使用的挡光片，如图 A－2－3 所示有条形的和 U 字形的两种. 取 Δs 较小的（约 1 cm）两种挡光片，在倾斜气轨上，测量在同一条件下某一点的速度，会发现二挡光片的测量值有明显差异. 可用游标卡尺慢慢推动滑块，观察测量二挡光片从开始计时到终止计时的移动距离的差异，进行分析，说明产生差异的原因.

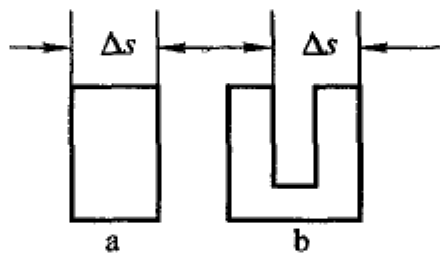


图 A－2－3

参考文献

[1] 沙振舜，马葭生. 气垫导轨实验. 上海：上海科学技术出版社，1984

实验 A－3 用共振法测量弹性模量

弹性模量是弹性体在伸长或压缩时的物理参量，当弹性棒振动时，棒要反复弯曲，这时棒的不同部位出现反复的伸长和压缩，因此其振动频率和弹性模量有关，从棒的振动频率可以了解制作棒的材料的弹性模量[1].

目的

1. 了解棒振动时，其振动频率的规律；
2. 用共振法测定弹性模量.

仪器和用具

信号发生器、频率计、放大器、示波器、耳机(2 个)、样品(圆棒).

原理

测量系统如图 A－3－1 所示. 当棒受力向下弯曲时，棒的下部被压缩，上部被拉伸，中心层则不变(图 A－3－2). 距中心层不同距离的薄层，被压缩或被拉伸的量也不同，设距中心层为 z 的薄层，截面积为 $\mathrm{d}S$，取此层一微元段 $\mathrm{d}x$，棒弯曲后，$\mathrm{d}x$ 段弯曲的角度为 $\mathrm{d}\varphi$，此微元段的缩小(或伸长)为 $z\mathrm{d}\varphi$，设弹性模量为 E，则相应的力为 $E\left(\frac{z\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x}\right)\mathrm{d}S$，此力对中心的力矩为 $E\left(\frac{z\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x}\right)z\mathrm{d}S$，截面上总力矩 M 为

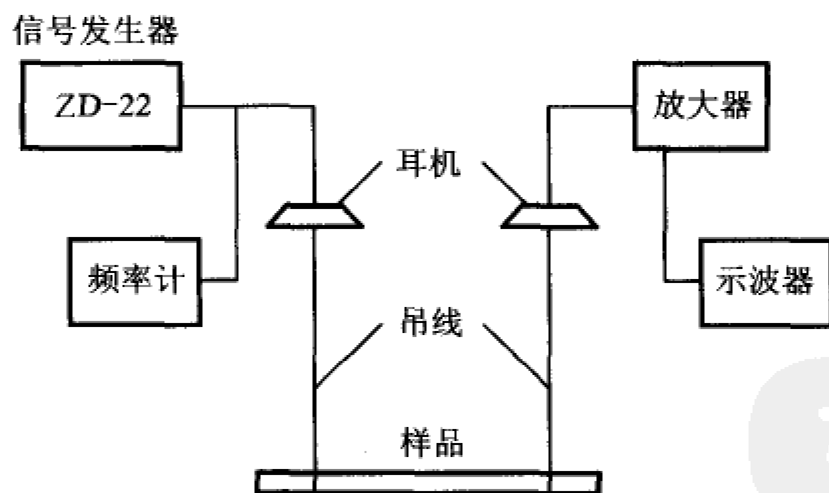


图 A－3－1

$$M = \frac{E\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x}\int_S z^2\mathrm{d}S \qquad (A-3-1)$$

式中积分应遍及整个截面，称为截面二次矩(惯性矩)，以 I 表示，则

$$M = EJ\frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x} \qquad (A-3-2)$$

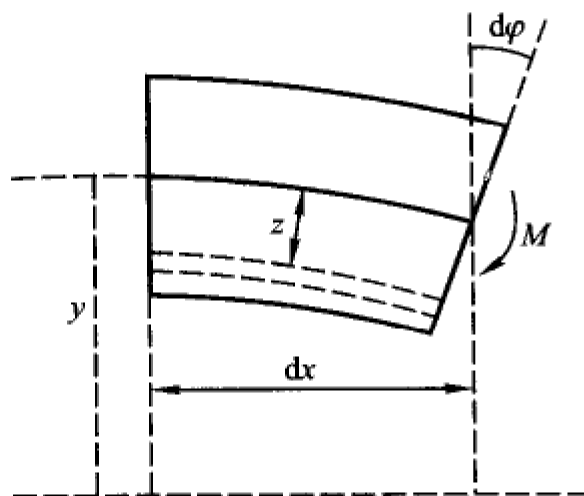


图 A－3－2

当棒弯曲较小时，可以认为 $d\varphi$ 等于棒在 dx 元段两端线斜率之差，即

$$d\varphi = -\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x+dx} + \left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)_{x} = -dx\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) \qquad (A-3-3)$$

将此 $d\varphi$ 代入式（A－3－2），则

$$M = -EI\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) \qquad (A-3-4)$$

此力矩在棒的各部分并不相等，它是到一端距离 x 的函数. 弯曲使棒上出现切应变，横向的切应力 F 的力矩 Fdx 应与 M 平衡，则

$$F = \frac{\partial M}{\partial x} = -EI\frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \qquad (A-3-5)$$

切应力 F 也是 x 的函数，对 dx 微元段

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x}dx \qquad (A-3-6)$$

此力等于 dx 微元段的加速度与质量（ρSdx）之积，棒的横向运动方程为（ρ 为密度）

$$\frac{\partial F}{\partial x}dx = \rho S dx\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \qquad (A-3-7)$$

结合式（A－3－5）得

$$-EI\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \rho S\frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

或

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\rho S}{EI}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \qquad (A-3-8)$$

用分离变量法解方程，令

$$y(x,t) = X(x) + T(t) \tag{A-3-9}$$

代入式(A－3－8)整理后,得

$$\frac{1}{X(x)}\frac{d^4X(x)}{dx^4} = -\frac{\rho S}{EI}\frac{d^2T(t)}{dt^2}\frac{1}{T(t)} \tag{A-3-10}$$

上式两侧分别为 $X(x)$、$T(t)$ 函数,只有等于一常数时才成立,设此常数为 K^4,则

$$\frac{d^4X(x)}{dx^4} - K^4X(x) = 0 \tag{A-3-11}$$

$$\frac{d^2T(t)}{dt^2} + K^4\frac{EI}{\rho S}T(t) = 0 \tag{A-3-12}$$

其通解为

$$X(x) = c_1\sin Kx + c_2\cos Kx + c_3\sinh Kx + c_4\cosh Kx \tag{A-3-13}$$

$$T(t) = c_5\sin \omega t + c_6\cos \omega t \tag{A-3-14}$$

式中 $\omega = \left(\frac{K^4EI}{\rho S}\right)^{1/2}$,于是棒的横振动的通解为

$$y(x,t) = (c_1\sin Kx + c_2\cos Kx + c_3\sinh Kx + c_4\cosh Kx)\times (c_5\sin \omega t + c_6\cos \omega t) \tag{A-3-15}$$

实际棒的振动模式取决于边界条件.

对于两端自由的棒,自由端的横向切应力为零,弯曲力矩为零,即

$$\left.\begin{aligned}&(1)\quad \left.\frac{d^3X(x)}{dx^3}\right|_{x=0} = 0,\quad \left.\frac{d^3X(x)}{dx^3}\right|_{x=l} = 0\\&(2)\quad \left.\frac{d^2X(x)}{dx^2}\right|_{x=0} = 0,\quad \left.\frac{d^2X(x)}{dx^2}\right|_{x=l} = 0\end{aligned}\right\} \tag{A-3-16}$$

式中 l 为棒长.

对式(A－3－13)求 $\frac{d^2X(x)}{dx^2}$ 和 $\frac{d^3X(x)}{dx^3}$,则对于:

$x=0$ 可得 $-c_2+c_4=0$, $-c_1+c_3=0$,即 $c_2=c_4$, $c_1=c_3$,

$x=l$ 时结合已知 $c_2=c_4$, $c_1=c_3$,得

$$\left.\begin{aligned}&c_1(\sin Kl - \sinh Kl) + c_2(\cos Kl - \cosh Kl) = 0\\&c_1(\cos Kl - \cosh Kl) - c_2(\sin Kl + \sinh Kl) = 0\end{aligned}\right\} \tag{A-3-17}$$

上二式移项后相除,消去 c_1、c_2,得

$$\frac{\sin Kl - \sinh Kl}{\cos Kl - \cosh Kl} = \frac{\cos Kl - \cosh Kl}{\sin Kl + \sinh Kl} \tag{A-3-18}$$

将上式中分母式交叉相乘后,整理化简为

$$\cos Kl \cdot \cosh Kl = 1 \tag{A-3-19}$$

上式为两端是自由端的棒振动时的容许频率条件.用数值解法,得出满足上式的

Kl 值为

Kl	0.000(静态)	4.730(基频)	7.853	10.996	14.137

已知 $\omega=\left(\frac{K^4EI}{\rho S}\right)^{1/2}=K^2\left(\frac{EI}{\rho S}\right)^{1/2}$，又 $\omega=2\pi\nu$，设

$$Kl=\pi\beta$$

$$\beta=Kl/\pi,\ K=\pi\beta/l$$

则

$$2\pi\nu=\left(\frac{\pi\beta}{l}\right)^2\left(\frac{EI}{\rho S}\right)^{1/2}$$

容许频率为

$$\nu=\frac{\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{EI}{\rho S}}\beta^2 \tag{A-3-20}$$

对于基频，$\beta=1.5056$，对各谐频 $\beta\approx n+0.5(n>1)$.

棒的振动模式：

将 $c_1=c_3, c_2=c_4$ 代入式(A－3－13)，得

$X(x)=c_1(\sin Kx+\sinh Kx)+c_2(\cos Kx+\cosh Kx)$

则

$$\frac{X(x)}{c_2}=\frac{c_1}{c_2}(\sin Kx+\sinh Kx)+(\cos Kx+\cosh Kx) \tag{A-3-21}$$

从式(A－3－17)可知

$$\frac{c_1}{c_2}=\frac{\sin Kl+\sinh Kx}{\cos Kl-\cosh Kl} \tag{A-3-22}$$

代入 Kl 可得

Kl	4.730	7.853	10.996	14.137	17.279
c_1/c_2	−0.9825	−1.0008	−0.99996	−1.0000	−0.9999

取

$$Kx=Kl\frac{x}{l}$$

则给出 x/l 值就可求出 $\frac{X(x)}{c_2}$ 值，而 c_2 为常数，所以 $\frac{X(x)}{c_2}$ 值可以表示振动的横位移.

对于基频 $Kl=4.730$

x/l	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\frac{X(x)}{c_2}$	2.00	1.07	0.20	−0.54	−1.04	−1.22	−1.04	−0.54	0.20	1.09	2.00

图 A－3－3 为基频的振动模式，从图上可以看出节点在距一端0.223l 处. 同样可以算出对 $Kl=7.833$ 的节点在 0.132l 处.

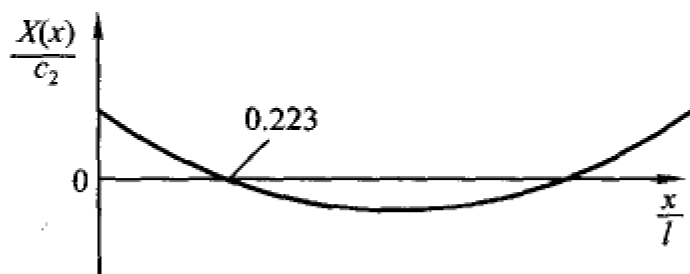


图 A－3－3

实验内容

1. 选取适当尺寸的样品，估计基频在 300～700 Hz 之间的.

2. 按图 A－3－1 组成测量系统，悬点在节点附近.

3. 输入并逐渐改变信号频率，探索基频信号频率. 当示波器上出现信号时，要检查它是否是样品棒的共振信号(用手摸一下样品棒去判断)，因为耳机的振动片也可能出现共振.

4. 改变悬挂点位置，考察它对测量的影响.

5. 改变信号频率，探索第一谐频信号频率.

6. 计算样品的弹性模量并分析测量误差.

7. 用一个内部有缺陷或经不同热处理的样品，再测一次.

实验例：样品为车条　直径 $d=0.2013$ cm、长 $l=18.19$ cm，质量 $m=4.533$ g.

实测　$\nu_1=273.5$ Hz，$\nu_2=753.4$ Hz，$\nu_3=1\,478$ Hz

计算得 $E=2.010\times10^{11}$ N/m^2

参考文献

[1]　(美)莫尔斯 P M，英格特 K U. 理论声学　上册. 吕如榆，杨训仁，译. 北京：科学出版社，1984：207—225

[2]　中国金属学会，中国有色金属学会. 金属物理性能及测试方法//金属材料物理性能手册　第一册. 北京：冶金工业出版社，1987

实验 A－4 弦振动与方波的谐波分析

目的

方波信号可以按傅里叶级数展开为一系列谐波，用电学实验方法可以探测这些谐波，在此实验中要从弦的机械振动去探测这些谐波激发的振动，从而增强对谐波的实在感以及加深对傅里叶级数的认识.

仪器和用具

XD－22 型低频信号发生器（可输出简谐波信号或方波信号）、示波器、移测显微镜、细铜丝[①]、稀土永久磁铁、重锤和照明灯等.

实验装置的布置如图 A－4－1 所示，将线密度为 ρ 的铜丝的一端固定，另一端绕过滑轮挂上质量为 m 的重锤. 铜丝串接一电阻 R（匹配电阻）后与信号发生器相接，弦长为 l，弦上张力 $F_T=mg$.

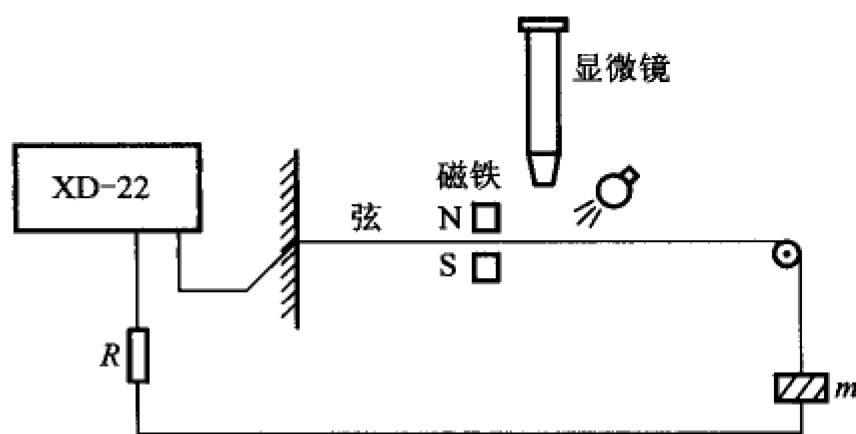


图 A－4－1

原理

1. 弦的自由振动频率

设金属弦长为 l，线密度为 ρ，当用张力 F_T 将弦拉直时，弦的自由振动频率 ν 为

① 作者使用过的铜丝的线密度约为 0.000 6 g/cm 和 0.000 3 g/cm，细的铜丝效果较好.

$$\nu \approx \frac{n}{2l}\sqrt{\frac{F_T}{\rho}}\left(1+\frac{2}{l}\sqrt{\frac{ESK^2}{F_T}}\right)^{①}, \quad n=1,2,3,\cdots \qquad (A-4-1)$$

式中的 E 为弦线的弹性模量，S 为弦线的截面积，K 为截面的回转半径，对半径很小的弦线，括号内第二项远小于 1，可以略去不计.

式中 n 取不同值时，弦的振动模式如图 A－4－2 所示. $n=1$ 的频率为基频 ν_0，$n=2,3,\cdots$时的频率为谐频.

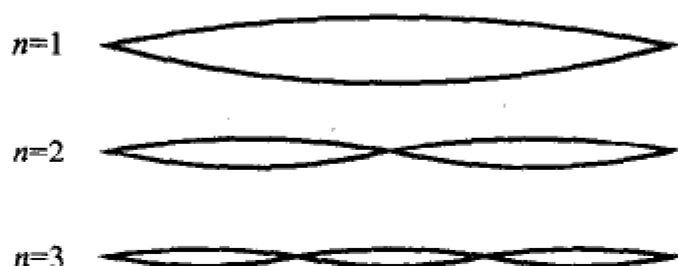


图 A－4－2

2. 弦的受迫振动

当图 A－4－1 的弦上通以交流电时，在磁场的作用下，弦将做强迫振动. 当交流为简谐波时，驱动力为简谐驱动力. 在磁场处受驱动的弦，将以波动向两侧传播，经两端反射后又和前进波叠加，当弦的驱动频率接近弦的基频或第一谐频时，此反复叠加的波形成振幅较大的驻波.

当简谐驱动力的频率 ν 在弦的基频 ν_0 附近时，弦以 $n=1$ 的模式响应，弦的振动可出现峰值，即发生共振. 弦的振幅 A 随驱动力频率 ν 的变化而变化，图 A－4－3 所示为一实验例.

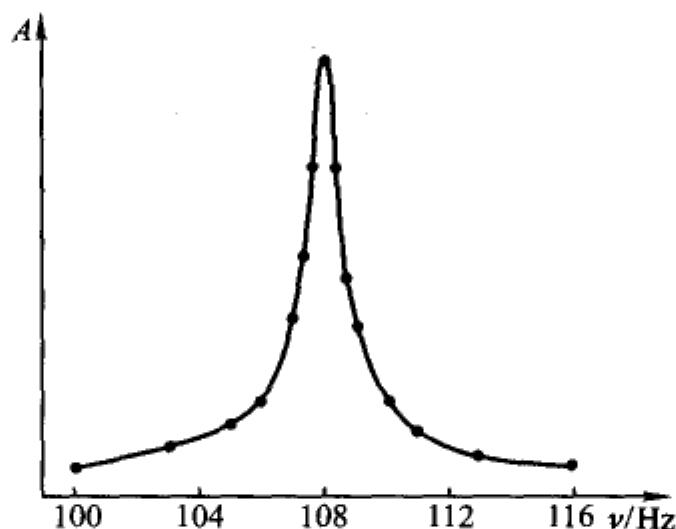


图 A－4－3

① （美）莫尔斯 P M，英格特 P U. 理论声学 上册. 吕如榆，杨训仁，译. 北京：科学出版社，1984：225

驱动力的频率 ν 从 ν_0 逐渐减小时，弦的响应迅速减弱，振动不再出现峰值.

驱动力的频率 ν 从 ν_0 逐渐增加时，弦的响应也迅速减弱，但在 ν 增加到 $n\nu_0$（$n=2,3,4,\cdots$）附近时，弦的响应又增加并出现峰值，但弦的振动模式为图 A－4－2 中的 $n=2$ 或 $n=3,\cdots$.

当弦上通以方波交流时，弦的振动响应将不同于加简谐波交流时的情形. 此实验主要是考察与分析此时弦的振动.

3. 方波的傅里叶级数

对于占空比为 1∶1的方波（图 A－4－4）

$$F(t)=A_0\sum_{k=0}^{\infty}\frac{\sin[(2k+1)2\pi\nu t]}{2k+1} \qquad (A-4-2)$$

对于一般的脉冲方波（图 A－4－5）

$$F(t)=A_0+A_1\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\sin(k\tau\nu\pi)}{k}\cos(k2\pi\nu t) \qquad (A-4-3)$$

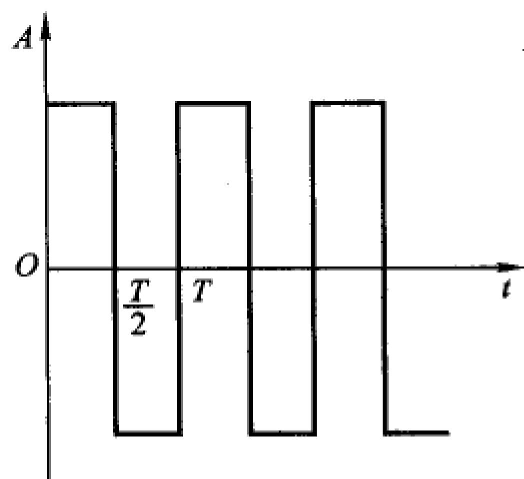


图 A－4－4

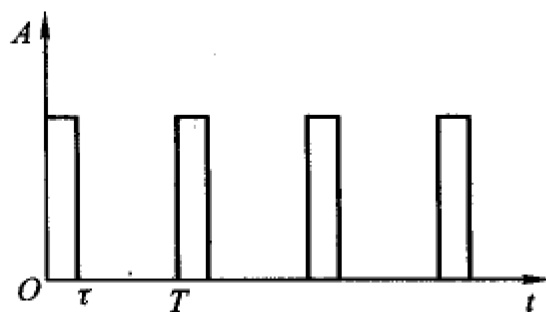


图 A－4－5

实验内容

1. 测量铜丝的线密度 ρ，适当选取弦长 l 和重锤质量 m 使弦的基频 ν_0 在 90～100 Hz 间.（ρ 与 m 取小些较好，弦长可在 60 cm 左右）.

计算弦的基频 ν_0.

2. 观测弦上加简谐波交流电时的振动

此项观测主要是为了和加方波时的振动相比较.

将移测显微镜置于弦长的中点 $l/2$ 处，磁铁置于显微镜附近适当位置，准备观测弦的振动并测振幅. 用小电灯照亮显微镜物镜下方的弦.

改变信号发生器的输出频率 ν，在 ν_0 附近探索，观察弦的振动，找出弦的振幅极大时的频率 ν，此值可能和 ν_0 有些差异[可能和略去式(A-4-1)中的补正项有关]，以下将此测量值作为弦的基频 ν_0.

使输出频率 ν 从稍大于 ν_0 开始减小，观察弦的振动，直到频率减到 10 Hz. 是否除在 ν 等于 ν_0 的附近，弦的振动出现峰值后，弦的振动迅速减弱而不再出现强的振动?

使输出频率 ν 从稍小于 ν_0 开始增大(这时要将显微镜从 $l/2$ 处移开些)，观察 $\nu>\nu_0$ 之后，振动是否出现峰值? 如果出现峰值就记下 ν 值，并检查弦的振动模式 $n=?$ (参照图 A-4-2)，直到 $\nu>5\nu_0$.

3. 弦上加占空比为 1:1的方波时的振动

将显微镜移至弦的中点 $l/2$ 处，磁铁置于显微镜近旁，用小电灯照亮弦，信号发生器改为输出方波信号.

用示波器检查方波信号的占空比是否为 1:1，如果不是要仔细调节.

使输出方波信号频率从稍大于 ν_0 开始减小，注意观察弦的振动，当振幅增大并出现峰值时(参照图 A-4-3)，测量峰值两侧若干频率 ν 及其振幅 A，并检查 $n=?$. 以下继续减小输出信号频率，每当弦振动出现峰值，都同样进行测量，直到 ν 达到 10.0 Hz 为止.

应当注意，弦的直径可能对振幅 A 的测量有不利影响，想一想如何测量? 其次，信号发生器的输出信号的电压幅度大一些对观测虽然有利，但不同峰值时弦的受力差别较大时对分析不同峰值间振幅的规律性有不利影响，因此方波信号的输出电压要适当小些，但要注意在整个实验过程输出信号电压要保持稳定不变，如有变化要及时调节.

其次，将显微镜移到 $l/4$ 处，磁铁置于其对称位置 $\frac{3}{4}l$ 处. 同上改变频率 ν，探索弦振动出现峰值的频率. 要注意在此要探索的除去显微镜在 $l/2$ 处已得知的一些频率外，还有其他的频率也引起弦振动出现峰值.

4. 弦上加占空比显著偏离 1:1的方波时的振动

显微镜移到弦的 $l/2$ 处，同上使方波频率 ν 从稍大于 ν_0 开始减小，观察弦的振动，搜索弦振动出现峰值时的频率并测振幅.(要检查信号的波形).

5. 实验的分析

(1) 在一张坐标纸上，绘制加 1:1方波时，弦振动的全部幅-频特性曲线.

(2) 分析在 $\nu<\nu_0$ 时，弦上加简谐波和加方波信号时，其振动规律为何有很大差异.

(3) 分析显微镜在 $l/2$ 和 $l/4$ 处时，观察到的弦振动为何有差异.

(4) 一般讲受迫振动的频率等于驱动力的频率，在弦上加方波时，对此应如

何理解.

(5) 绘制弦振动在加不同占空比方波时的频谱.

(6) 分析此实验各条件的选择.

6. 设计或设想

设计输出其他波形的信号去实验.

参考文献

[1] (美)莫尔斯 P M,英格特 K U. 理论声学　上册. 吕如榆,杨训仁,译. 北京:科学出版社,1984:225

[2] 杨述武. 弦振动与方波的傅里叶分析. 物理实验,1995,15(2):51—53

实验 A-5　粘性阻尼、磁阻尼、压差阻尼特性的研究

目的

如何用实验的手段分析研究某些未知外力对物体运动的影响并确定它们所遵从的规律是生产实践中经常遇到的问题. 例如舰艇航行中流体阻力的影响,飞机飞行中气流阻力的影响等问题,均属于这类问题. 本实验通过对气垫导轨上滑块在运动过程中所受到的粘性阻尼力、磁阻尼力、压差阻尼力的影响的研究,学习处理这类问题的思想方法. 本实验具体研究内容如下:

1. 研究由于气体内摩擦所引起的粘性摩擦阻力对导轨上滑块运动的影响,用实验的方法测定粘性阻尼系数,决定影响粘性阻尼系数大小的有关因素;

2. 对滑块的运动施加磁阻尼,研究磁阻尼对滑块运动的影响,决定磁阻尼系数的大小;

3. 压差阻尼是另一种类型的阻尼,研究压差阻尼所遵从的规律,决定压差阻尼系数的大小;

4. 在以上三种阻尼同时作用时,滑块所受阻尼力的大小,三种阻尼力是否满足线性相加的规律? 试得出结果.

仪器和用具

气垫导轨与滑块、气源、劲度系数不同的两对弹簧、小永久磁铁块 3 对、金属

或塑料薄圆板 3 块(要求各圆板的面积大小不同,但其质量相同)、数字计时器(可用 VAFN 多用数字计时器)、记录纸带传动装置、高压火花发生器、米尺. 如果你设计的实验方案中需要提供其他设备,可向实验室提出申请.

原理

1. 粘性摩擦阻力对滑块运动影响的物理模型

用实验的方法研究粘性摩擦阻力对滑块运动的影响时,首先要从实际出发,建立一个物理模型,并依此推导和建立包含所要测量的物理量的数学表达式,作为选择实验方案的基础. 当然物理模型是否反映所研究问题的客观实际,推导过程是否正确,最后还要由实验结果加以验证. 必要时,结合实验测试结果,对原物理模型加以修正完善.

滑块在导轨上运动时所受到的粘性摩擦阻力是一种气体的内摩擦力,由气体内摩擦理论知道,如果用 $F_{阻}$ 表示粘性摩擦阻力,则在滑块速度不太大时,可以认为由下式决定[1]:

$$F_{阻}=\eta\frac{\Delta v}{\Delta d}A \quad (A-5-1)$$

式中$\frac{\Delta v}{\Delta d}$表示滑块和导轨之间气层的速度梯度,$A$ 是滑块和导轨之间气层的面积,实际上就等于滑块的内表面积,η 是空气的粘度. 对导轨上运动的滑块而言,和导轨表面接触处气层的定向运动速度为零,而和运动滑块底面相接触处的气层定向运动速度等于滑块定向运动速度,用 v 表示,Δd 表示滑块和导轨之间在垂直于导轨表面方向气层的厚度,也就是滑块在垂直于导轨表面方向的漂浮高度,用 h 表示. 按上述的物理模型,速度梯度可以改写为

$$\frac{\Delta v}{\Delta d}=\frac{v}{h} \quad (A-5-2)$$

代入式(A-5-1)得

$$F_{阻}=\eta\frac{A}{h}v \quad (A-5-3)$$

上式表示,在一定的实验条件下,即恒定的气源、滑块和导轨,上式中的 η、A、h 都是不变的常量,因此,可以认为粘性阻力 $F_{阻}$ 和滑块的速度 v 成正比,则式(A-5-3)可以写为

$$F_{阻}=bv \quad (A-5-4)$$

式中 $b=\eta\frac{A}{h}$称为粘性阻尼系数. 它在数值上等于滑块具有单位速度时,其所受的粘性阻力的大小. 显然,粘性阻力是和滑块滑动摩擦力性质不同的另一种气体

间的内摩擦力，它是随滑块速度作线性变化的外力，而这种和滑块的速度线性相关的特性正是粘性阻力不同于其他类型阻尼力的主要特点.

2. 粘性阻尼力对滑块运动的影响

设滑块在已调成水平的导轨上受粘性阻尼力 $F_{阻}=bv$ 的作用而运动，如图 A－5－1 所示，其运动方程为

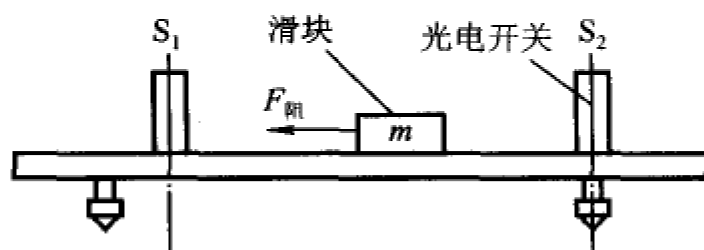


图 A－5－1

$$m\frac{dv}{dt}=-F_{阻} \tag{A－5－5}$$

求解方程(A－5－5)，设滑块运动的边界条件为 $t=t_1$ 时，$x=x_1$，$v=v_1$；$t=t_2$ 时，$x=x_2$，$v=v_2$，则

$$\int_{v_1}^{v_2}dv=-\frac{b}{m}\int_{x_1}^{x_2}dx \tag{A－5－6}$$

即得

$$v_2-v_1=-\frac{b}{m}(x_2-x_1)=-\frac{b}{m}s \tag{A－5－7}$$

上式表明，由粘性阻尼力作用所引起的滑块速度损失除和粘性阻尼系数 b 及滑块的质量 m 有关外，还与滑块运动的距离 s 成正比.

其次，考虑粘性阻尼力对滑块和两个弹簧组成的弹簧振子振动的影响. 如图 A－5－2 所示，滑块连接在两个弹簧中间，构成弹簧振子，当把滑块拉离平衡位置时，滑块将在左右弹簧的弹性恢复力及粘性阻尼力的共同作用下做阻尼振动，其运动方程为

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=-2kx-bv \tag{A－5－8}$$

式中 k 为弹簧的劲度系数.

解方程(A－5－8)，可以证明，该阻尼振动的振幅必按指数规律衰减，即

$$A_t=A_0\exp\left(-\frac{b}{2m}t\right) \tag{A－5－9}$$

式中 A_0 为 $t=0$ 时的振幅，若测得振动周期为 T，则 n 次振动后，即 $t=nT$ 时，振动的振幅为 A_n，如图 A－5－3 所示.

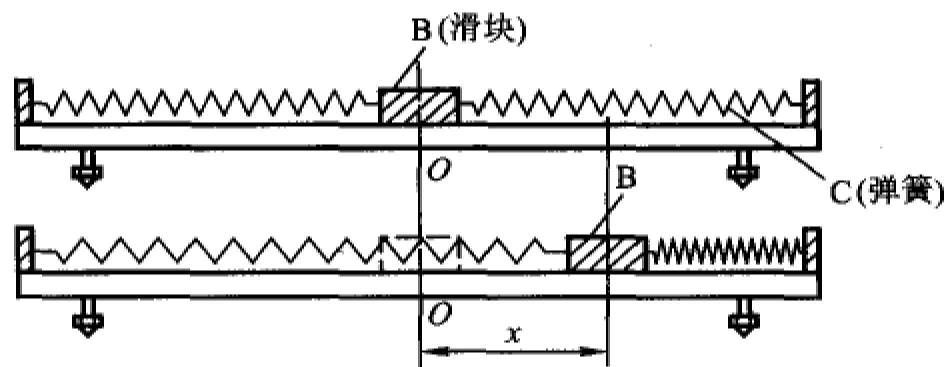


图 A-5-2

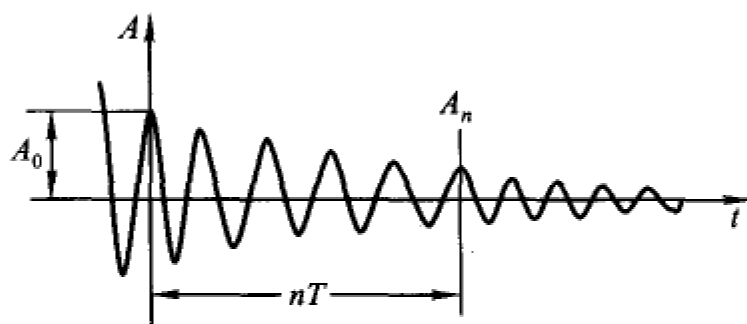


图 A-5-3

由以上的讨论可知,公式(A-5-7)和公式(A-5-9)反映了和速度成线性关系的粘性阻尼力对滑块运动影响所具有的主要特征,即滑块的速度损失和其经过的距离成正比,而做阻尼振动时,其振幅随时间按指数规律衰减. 按逻辑推理,当我们探讨磁阻尼、压差阻尼这类未知其特性和规律的阻尼力并希望建立这类阻尼力和滑块速度关系时,可采用反推法,即在磁阻尼力或压差阻尼力作用下,滑块的运动具有公式(A-5-7)和(A-5-9)的特性,则可推知,磁阻尼力及压差阻尼力和滑块速度具有公式(A-5-4)所表示的线性关系,而相应的阻尼系数则分别称为磁阻尼系数 b_m 及压差阻尼系数 b_p.

3. 粘性阻尼系数 b 的测量

在制订粘性阻尼系数 b 的测量方案中,需要特别指出的是:由于粘性阻尼力很小,因而对滑块运动的影响也很小,所以在拟订的测量方案中,必须排除其他误差因素对测量 b 的影响,突出和强化粘性阻尼力 $F_{阻}$ 对滑块运动的影响. 你必须十分有把握证实,滑块速度的变化是由于粘性阻尼力 $F_{阻}$ 引起的,而不是其他因素,如导轨没有调到水平,导轨不平整等因素造成的. 其次,你采用的测 b 的方法,在相同的测量条件下有重复性和再现性,并和其他方法测出的 b 有可比拟性. 以下介绍两种方法供参考,我们希望读者设计其他的测量方案.

方法一:在倾斜导轨上用往复测量法测量 b.

把导轨倾斜一小角度 θ,如图 A-5-4 所示,此时,滑块受到重力沿斜面的

分力 $mg\sin\theta$ 及粘性阻尼力 $F_{阻}=bv$ 的作用，运动方程为

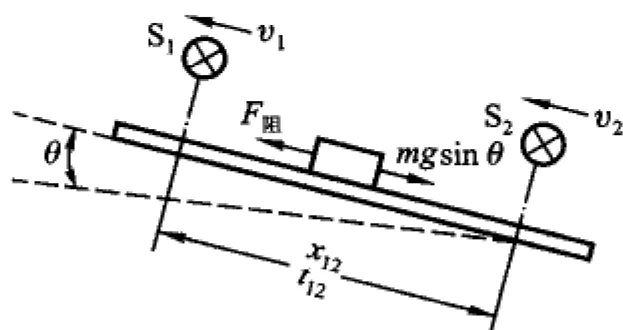


图 A－5－4

$$m\frac{d^2x}{dt^2}=mg\sin\theta-bv \qquad (A-5-10)$$

如以滑块通过第一个光电开关作为计时的起点，测出滑块通过第一个及第二个光电门 S_1 及 S_2 的速度为 v_1 及 v_2，由 S_1 到 S_2 的时间及距离分别为 t_{12} 及 x_{12}，则式（A－5－10）的解可写为

$$v_2-v_1=g\sin\theta t_{12}-\frac{b}{m}x_{12} \qquad (A-5-11)$$

从理论上讲，可以根据上式来测量 b，但实际上在上式中包含了导轨的倾角 θ，而导轨的倾角无法准确测量，因为，我们认为已调到水平的导轨在实际上可能仍包含极微小的倾角，而任何微小倾角误差都对 b 值测量的准确性带来很大的影响.

为解决 θ 角无法准确测量的困难，可采用天平复称法类似的思想方法. 实验中，保持导轨的倾角不变，使滑块和导轨低端的缓冲弹簧碰撞后逆向弹回，滑块依次通过光电开关 S_2 和 S_1，相应的速度为 v_3 和 v_4，时间为 t_{34}，根据式（A－5－11），有

$$v_4-v_3=-g\sin\theta t_{34}-\frac{bx_{12}}{m} \qquad (A-5-12)$$

在式（A－5－11）及（A－5－12）中，倾角 θ 是完全相同的，联立以上两式，得

$$b=\frac{[(v_3-v_4)t_{12}-(v_2-v_1)t_{34}]m}{x_{12}(t_{12}+t_{34})} \qquad (A-5-13)$$

式（A－5－13）即为粘性阻尼系数 b 的测量公式. 该测量方法的优点在于：① 利用在同一倾角下滑块的下滑和上滑的两组测量数据，消除了难于测量的倾角 θ 的影响. ② 在公式（A－5－13）中，除两个光电开关之间的距离 x_{12} 外，其他各量都可用光电计时法准确测量，因而有较高的精度，从而保证 b 测量的准确可靠.

方法二：阻尼振动法测 b.

由公式（A－5－9）可知，在粘性阻尼力作用下，滑块的振幅将按指数规律衰减. 若设法测得 $t=0$ 时的振幅 A_0 及 $t=nT$ 时的振幅为 A_n，则可求得

$$b=\frac{2m\ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right)}{nT} \qquad (A-5-14)$$

阻尼振动振幅衰减曲线可以采用如图 A－5－5 所示的记录装置测量. 图中 a 是弹簧,它和导轨上的滑块 b 一起组成一个振动系统. c 为装在滑块上并和滑块一起运动的火花电极,它是和弹簧导通的,而弹簧的一端又和火花发生器 f 的高压输出端相连. 为了展现滑块在往复振动过程中位置随时间的变化,需要使图示的记录纸在垂直于导轨方向做匀速运动,而火花记录纸的匀速直线运动是由记录纸带传动机构实现的. 图中的 d 轴由 DN－9 可逆电机驱动,带动记录纸带做匀速运动. 在火花电极 c 的相对面,另有一根轴 e,它是和高压火花发生器的另一高压输出端相连的. 这样,在火花电极和轴 e 之间就形成了高压跳火间隙. 因此,当火花电极 c 和滑块一起在导轨上做往复运动时,记录纸带则在驱动机构的带动下在垂直于导轨方向上做匀速运动,通过高压跳火,非常直观而清晰地把振动曲线(包括简谐振动或阻尼振动)记录下来. 利用这些振动曲线,就可求得表征振动系统特性的一系列参量.

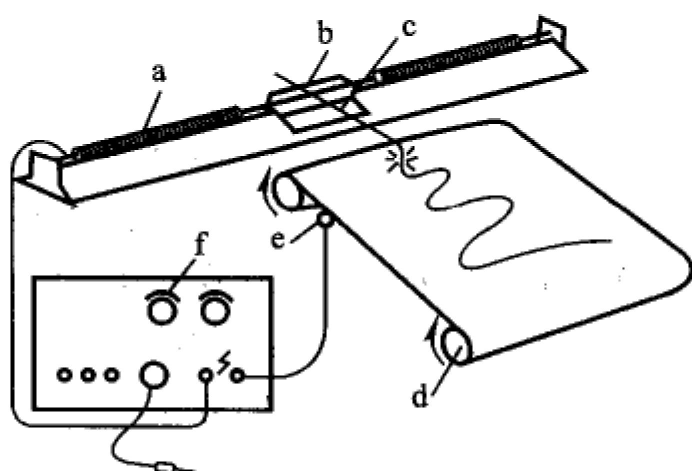


图 A－5－5

高压火花发生器①的工作原理如下:

该仪器能按一定的时间间隔产生高压脉冲,高压脉冲通过绝缘导线输送到相距很近(一般约为 3 mm 左右)的火花电极上,从而在两电极之间按一定的频率产生高压跳火. 如果在两极之间放上特制的热敏火花记录纸,则高压跳火时就能在纸上留下火花点.

4. 磁阻尼力的产生方法

在滑块的两侧面用双面粘胶带粘贴小的永磁铁,如图 A－5－6 所示. 这样,

① 可参阅西安教学仪器厂为其产品编写的《高压火花记录仪使用说明书》.

当滑块在导轨上运动时，永磁体和导轨发生相对运动，因而在导轨金属表面中感应产生涡电流，该涡电流由于处在永磁体的磁场中，必受到磁力的作用，其方向和滑块运动的方向相反.

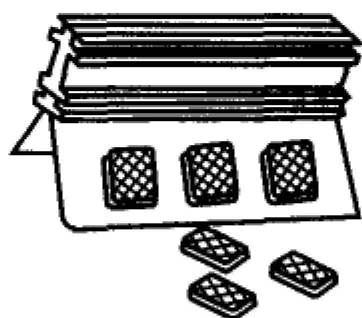


图 A－5－6

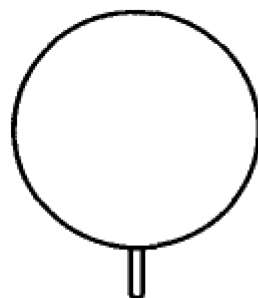


图 A－5－7

5. 压差阻尼力的产生方法

可以采用圆板阻尼的方法产生压差阻尼力. 如图 A－5－7 所示，是一块带安装杆的金属或塑料圆板，可用螺帽固定安装在滑块上，并使圆板平面和滑块运动方向垂直. 当滑块运动时，圆板一方的气体受压，压强增大，另一方的气体膨胀，压强减小，从而形成压差阻尼力. 显然，压差阻尼力的大小和圆板的面积及滑块运动的速度有关.

实验内容

1. 分别用倾斜导轨往复测量法及阻尼振动法测粘性阻尼系数 b，两种方法测得的粘性阻尼系数值在量级上是否一致？两者如有差异，是否可作出合理的解释？改变气源的供气状况及滑块的质量，研究对粘性阻尼系数的影响.

2. 在滑块的两侧对称位置分别用双面粘胶带加两块及四块永磁铁（注意：实验中要保持滑块和磁铁一起的总质量维持不变）. 测量加两块及四块永磁铁所相应的磁阻尼系数，并测定在磁阻尼作用下，其阻尼振动振幅衰减是否仍满足指数衰减规律. 对你的实验结果作出分析和结论.

3. 研究有压差阻尼后，其阻尼系数有何变化？当有压差阻尼存在时，其阻尼振动振幅衰减规律是否仍是指数衰减？

4. 同时存在磁阻尼和压差阻尼时，其总的阻尼系数和前面分别作用时的阻尼系数有何关系？各阻尼系数是否满足线性相加的法则？

思　考　题

1. 用阻尼振动法测得的粘性阻尼系数 b 要比用倾斜导轨复测法测得的 b 大些，原因何

在？你能否对此作出解释？

2. 用阻尼振动法测存在磁阻尼时的阻尼系数 b 时，能否从阻尼振动的衰减曲线，证明磁阻尼力和速度的线性关系是否成立？另外，从电磁感应的角度给出理论分析.

3. 能否根据误差传递公式，推导公式（A－5－13）中，阻尼系数 b 的相对误差？

参考文献

[1]　沙振舜，马葭生. 气垫导轨实验. 上海：上海科学技术出版社，1984：25，104

实验 A－6　高温超导体的临界温度和临界电流的测量

在各种新材料特性研究中，其电特性的研究占有相当重要的地位，往往由此揭示新的物理规律和这些材料新的应用前景. 追溯超导电现象的发现历史，就是在著名低温物理学家昂尼斯（K. Onnes，1853—1926）的指导下，实现了氦的液化，达到 4.2 K 这个当时所能达到的最低温度后，探索在所达到的新的低温区内各种金属电阻变化规律，当选用纯汞做实验时，发现随着温度的下降，汞的电阻先是平缓地减小，而在 4.2 K 附近，电阻在很窄的温区内，突然降为零. 如图 A－6－1 所示. 他把这种显示零电阻特性的物质状态定为"超导态"，该现象称为"超导电性". 又如现在广泛应用的半导体，其基本特性的揭示是和电阻－温度关系的研究分不开的. 而在低温测量中广泛应用的电阻温度计，完全是建立在对各种类型材料的电阻－温度关系研究的基础上的.

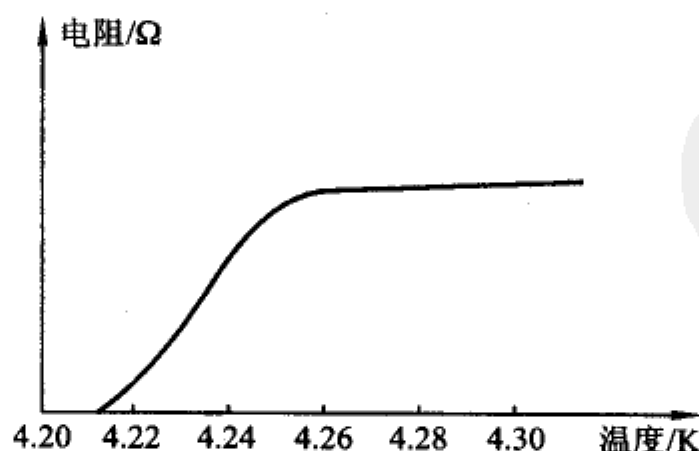


图 A－6－1　汞的电阻与温度关系

目的

本实验就是利用电磁测量的基本手段来研究高温超导体，测量反映高温超导体基本特性的两个物理量——临界温度和临界电流，从而初步熟悉通过电磁测量手段研究材料特性的方法．

在掌握超导材料临界温度和临界电流测试原理和方法的基础上，拟订测量方案，设计测量线路，在所提供的测试仪器和设备的条件下，合理地选配仪器，拟订测试和操作步骤，测定钇钡铜氧高温氧化物超导样品的临界温度和临界电流，并计算样品室温及刚开始偏离线性时的电阻率．

仪器和用具

低温装置（包括真空玻璃杜瓦和测试探头）、数字电压表 2 台$\left(\text{分别为 } 4\frac{1}{2} \text{ 和 } 5\frac{1}{2} \text{ 位的数字电压表}\right)$、铂电阻温度计或铜－康铜温差电偶、恒流源（100 mA，100 Ω）、直流稳压电源与标准电阻（10 Ω、1 Ω）、高温超导样品、铟丝、银引线（或细漆包线）、液氮、直流放大器．

原理

1．超导体的基本特性——零电阻现象和迈斯纳效应

超导材料有两个不同于其他材料的最基本特性，即零电阻现象和完全抗磁性（也称迈斯纳效应）．零电阻现象是指具有超导电性的材料，当温度下降时，其电阻随温度下降发生缓慢的变化（一种是金属性的材料，其电阻缓慢下降；一种是显示半导体性，其电阻缓慢升高），而当到达某一温度时，其电阻在很窄的温区内，从 R_n 急剧地变为零，超导体呈现零电阻现象．为描述电阻陡降的突变过程，可以定义如下几个特征温度：起始转变温度 $T_{起始}$ 是指电阻随温度的变化偏离线性的温度；临界温度 T_c 是指电阻值下降到 $R_n/2$ 时所对应的温度，零电阻温度 $T_{R=0}$ 为电阻刚降至零时对应的温度，而把电阻变化 1/10 到 9/10 所对应的温度间隔定义为转变宽度 ΔT，如图 A－6－2 所示．超导体的另一个重要电磁特性是完全抗磁性，即所谓迈斯纳效应[1]．不论超导体是先降温到超导态再加磁场，还是先加磁场后降温，只要温度低于零电阻温度，置于磁场下超导体内的磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 都恒等于零，磁场被排斥到超导体外面，该现象称为迈斯纳效应．该效应是超导体区别于理想导体的独有特性．由于磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 和磁场强度 $\boldsymbol{H}$ 有如下

关系[2]：

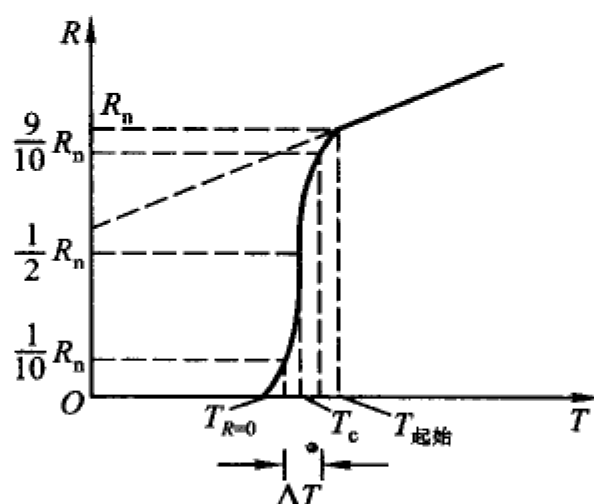


图 A－6－2

$$\boldsymbol{B}=\mu_0\mu_r\boldsymbol{H}=(1+\chi_m)\boldsymbol{M}\cdot\boldsymbol{H} \qquad (A-6-1)$$

式中 μ_0 为真空磁导率，μ_r 为介质的相对磁导率，χ_m 为磁化率. 当发生正常态到超导态的转变时，μ_r 由 1 变到零，或者说磁化率由近于零变到 －1，从而使超导体内部 $\boldsymbol{B}=0$. 如果把超导材料做成线圈的芯子，则线圈自感 L 和介质的磁导率的关系如下：

$$L=\mu_r\mu_0 n^2 V \qquad (A-6-2)$$

式中 n 为线圈单位长度的匝数，V 为线圈的体积，可见当发生超导转变时，磁导率 μ_r 发生变化，线圈的电感也变化. 利用超导转变时线圈电感变化来测量临界温度的方法，称为电感法.

2. 临界电流

当通过超导线的电流超过一定的数值后，超导态便被破坏，转变为正常态，该电流 I_c 称为超导体的临界电流. 当电流超过一定值后，所以能引起超导态到正常态的转化，其根本原因是由于电流所产生的磁场（自场）超过临界磁场引起的. 各超导体临界电流的大小，除和超导材料组成和结构有关外，对同一种超导材料而言，与其截面积的大小和形状有关.

3. 测量方法及参考方案

电阻法测临界电流最常用的方法是四引线法. 四引线法示意图如图 A－6－3 所示，其中两端的电流引线与恒流源相连，两根电压引线则和能检测到微伏量级的数字电压表相连，用以检测超导样品的电压. 当产生超导转变时，其电压降为零. 采用四引线法的优点在于能够避免引线及接点电阻所引入的测量误差. 由于数字电压表的输入阻抗很高，所以引线和接点的接触电阻均可忽略.

用四引线法测超导转变温度的原理简图如图 A－6－4 所示. 图中温度测量是用铜－康铜温差电偶，也可采用铂电阻温度计，铂电阻温度计电阻和温度的对

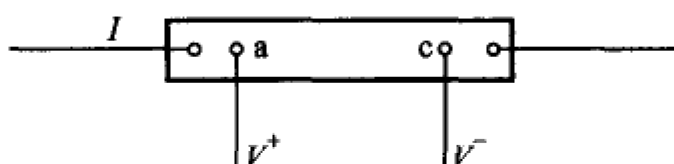


图 A－6－3 四引线法

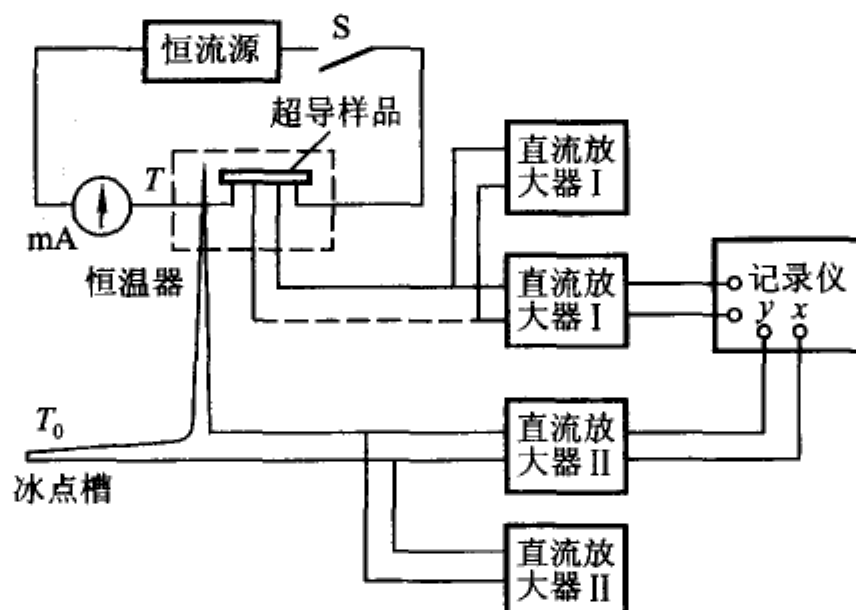


图 A－6－4 四引线法测量 T_c 装置的示意图

应关系见文献[3]所附分度值表. 如用铜－康铜温差电偶,则必须利用铂电阻温度计在所使用的温区(即 77 K～室温)对铜－康铜温差电偶进行定标. 通过样品的电流在毫安量级.

实验中采用的低温装置是一种简易的真空玻璃杜瓦瓶,内盛液氮,低温可到达液氮温度. 超导样品和测量用铂电阻温度计或铜－康铜温差电偶安装在测试探头上,如图 A－6－5 所示. 当把测试探头浸入液氮并达到热平衡时,恒温紫铜块、超导样品和温度计均达到液氮温度. 提升探头至液氮以上,恒温紫铜块和超导样品同步逐渐升温,可测出超导样品输出电压随温度的变化曲线.

本实验所用的高温超导样品是采用烧结工艺制备的多晶超导块材料,其结构式为 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$,式中 δ 为与超导样品氧含量有关的系数,样品的转变温度约为 92 K 左右,由于该样品无法用焊接法直接引出引线,四引线法的四根引线是用铟丝将细银丝粘压在高温超导样品表面,然后再焊在接线片上. 所有引线均由德银管引出与德银管上端的接线插座相连,并由接头接到测量电路.

临界电流的测量线路也可用图 A－6－4 说明,即只要把图A－6－4中的恒流源改用输出电压可调的稳压电源,毫安表改用额定电流为数安培的取样电阻就可以了. 改变稳压电源的输出电压,即可改变电流,直到样品发生超导态到正

常态的转变. 本实验只要求测出液氮温区的临界电流. 电路、仪器的配置和参数的选择由同学自己考虑选取.

若采用磁测量法测转变温度,可参阅本实验后所附参考文献[5],自己组装测量线路和调试测量装置. 在科研工作中,由于研究工作的需要,往往要根据或参考别人的文献,并根据自己所需解决的问题和仪器设备条件,加以适当的改进,实现测量,这也是科研能力的训练.

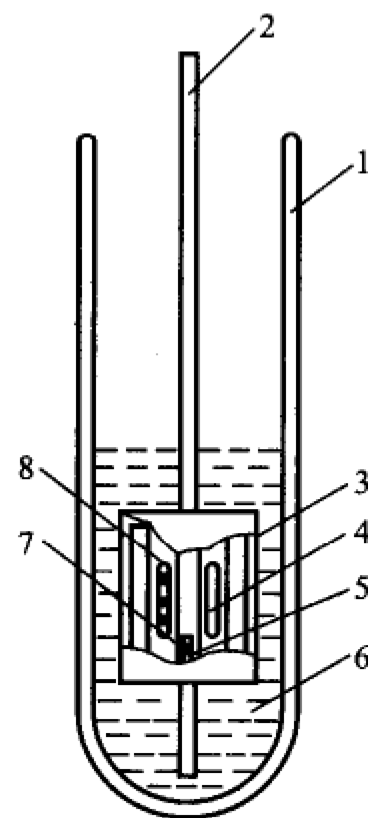


图 A-6-5 低温装置简图

1——真空玻璃杜瓦;2——德银管;3——外套筒;4——超导样品;5——恒温紫铜块;6——液氮;7——铂电阻温度计;8——接线片

在以上测试中由于要用到低温容器与液氮,使用中必须注意遵守下列安全规则:

(1) 所有盛放有低温液氮的容器都必须留有供蒸发气体逸出的孔道,以免容器内压力过大引起事故.

(2) 液氮灌入玻璃杜瓦时,应缓慢灌入,避免骤冷引起杜瓦的破裂. 灌注液氮采用专用液氮灌注器.

(3) 实验中注意不要让液氮触及裸露的皮肤特别是眼睛,以免造成严重的冻伤.

(4) 使用液氮时,室内应保持空气通畅,防止液氮的大量蒸发造成室内缺氧. 因为氧含量低于 14% ~15% ,会引起人的昏厥.

实验内容

1. 高温超导样品的准备

本实验提供的高温超导样品,是用一般陶瓷烧结工艺制备的,先按照1:2:3的理想配比,将氧化钇、氧化铜和碳酸钡的分析纯粉末混合,然后经过研磨、预烧、压片和烧结等工艺制成直径为 12 mm、厚度为 1 mm 的超导圆片,结构式为 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. 经切割后成为 2 mm×1 mm 截面的条形试样. 粘压引线的方法如下:把从铟丝上切割下的铟粒新鲜面用削尖的竹签压贴在试样的表面,银引线的一端置于压贴好的新鲜铟面上,上端再用新鲜的铟粒面压贴固定,这样可形成良好的欧姆接触. 可用万用表检查接点是否良好.

2. 用四引线法测量高温超导样品的临界温度,求出几个特征温度. 根据提供的测试仪器和设备,决定测量方案和测试线路,选择测量参数和操作步骤,完成测量.

3. 测量所提供样品的临界电流，计算临界电流密度.

*4. 参阅参考文献，用磁测量法测量临界温度，同学也可根据迈斯纳效应的特点，设计其他观察研究迈斯纳效应的实验方法.

参考文献

[1]　章立源，等. 超导物理. 北京：电子工业出版社，1987：8

[2]　贾起民，郑永令. 电磁学　下册. 上海：复旦大学出版社，1987：182—190

[3]　戴乐山. 温度计量. 北京：中国计量出版社，1987：182—190

[4]　吕斯骅，朱印康. 近代物理实验技术. 北京：高等教育出版社，1991：240

[5]　俞永勤，等. 频率法在高温超导体中的应用. 低温与超导，1989，17(4)：39—42

实验 A－7　温度－电压变换及变换特性线性化

目的

1. 测定负温度系数热敏电阻的电阻－温度特性，并利用直线拟合的数据处理方法，求其材料常量；

2. 了解以热敏电阻为检测元件的温度传感器的电路结构及电路参数的选择原则；

3. 学习运用线性电路和运放电路理论分析温度传感器电压－温度特性的基本方法；

4. 掌握以迭代法为基础的温度传感器电路参数的数值计算技术；

5. 训练温度传感器的实验研究能力.

仪器和用具

TS－C 型温度传感技术实验仪、磁力搅拌加热器、ZX21 型电阻箱、数字万用表、水银温度计（0～100 ℃）、烧杯、变压器油.

原理

具有负温度系数的热敏电阻广泛地应用于温度测量和温度控制技术中.这类热敏电阻大多数是由一些过渡金属氧化物(主要有 Mn、Co、Ni、Fe 等氧化物)在一定的烧结条件下形成的半导体金属氧化物作为基本材料制作而成,它们具有 p 型半导体的特性.对于一般半导体材料,电阻率随温度变化主要依赖于载流子浓度,而迁移率随温度的变化相对来说可以忽略.但对上述过渡金属氧化物则有所不同,在室温范围内基本上已全部电离,即载流子浓度基本与温度无关,此时主要考虑迁移率与温度的关系,随着温度升高,迁移率增加,所以这类金属氧化物半导体的电阻率下降,根据理论分析[1],对于这类热敏电阻的电阻-温度特性的数学表达式通常可以表示为

$$R_t = R_{25} \cdot \exp[B_n(1\ \mathrm{K}/T - 1/298)] \qquad (A-7-1)$$

其中 R_{25} 和 R_t 分别表示环境温度为 25 ℃和 t(以℃为单位)时热敏电阻的阻值;T 的单位为 K,$T = (273 + t/℃)\ \mathrm{K}$;$B_n$ 为材料常量,其大小随制作热敏电阻时选用的材料和配方而异,对于某一确定的热敏电阻元件,它可由实验上测得的电阻-温度曲线的实验数据,用适当的数据处理方法求得.

下面对以这种热敏电阻为检测元件的温度传感器的电路结构、工作原理、电压-温度特性的线性化、电路参数的选择和非线性误差等问题论述如下:

1. 电路结构及工作原理

电路结构如图 A-7-1(a)所示,它是由含 R_t 的桥式电路及差分运算放大电路两个主要部分组成.当热敏电阻 R_t 所在环境温度变化时,差分放大器的输入信号及其输出电压 V_o 均要发生变化.传感器输出电压 V_o 随检测元件 R_t 环境温度变化的关系称温度传感器的电压-温度特性.为了定量分析这一特性,可利用电路理论中的戴维南定理把图 A-7-1(a)所示的电路等效变换成图 A-7-1(b)所示的电路,在图 A-7-1(b)中:

$$R_{G1} = \frac{R_1 \cdot R_t}{R_1 + R_t}, \quad E_{S1} = \frac{R_t}{R_1 + R_t} V_s \qquad (A-7-2)$$

它们均与温度有关;而

$$R_{G2} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}, \quad E_{S2} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_s \qquad (A-7-3)$$

与温度无关.根据电路理论中的叠加原理,差分运算放大器输出电压 V_o 可表示为

$$V_o = V_{o-} + V_{o+} \qquad (A-7-4)$$

其中 V_{o-} 和 V_{o+} 分别为图 A-7-1(b)所示电路中 E_{S1} 和 E_{S2} 单独作用时对输出电

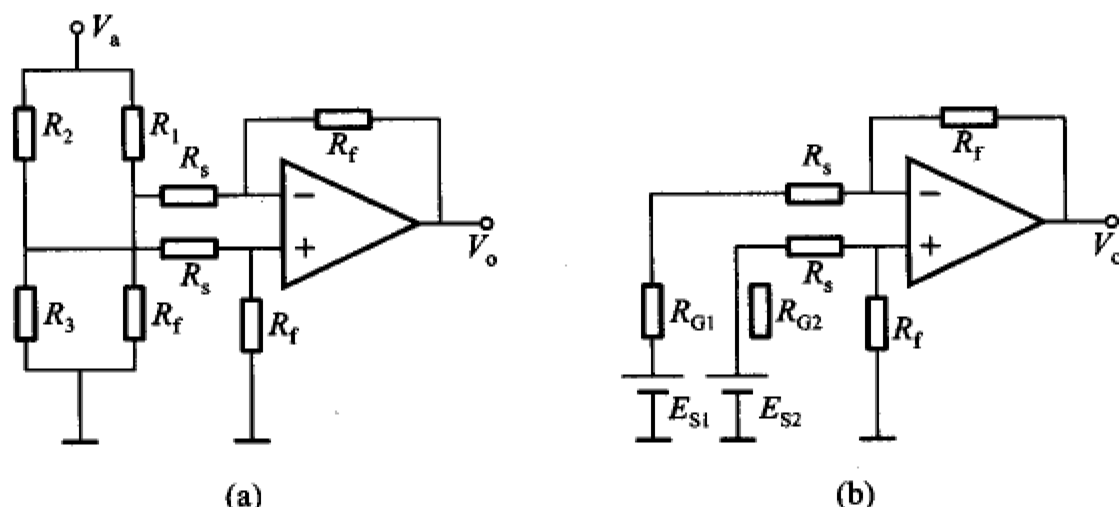


图 A－7－1　电路原理图及其等效电路

压的贡献. 由运算放大器的理论知

$$V_{o-}=-\frac{R_f}{R_s+R_{G1}}\cdot E_{S1},\quad V_{o+}=\left[\frac{R_f}{R_s+R_{G1}}+1\right]V_{i+} \qquad (A-7-5)$$

式中的 V_{i+} 为 E_{S2} 单独作用时运放电路同相输入端的对地电压. 由于运放电路输入阻抗很大,故

$$V_{i+}=E_{S2}\cdot R_f/(R_s+R_{G2}+R_f) \qquad (A-7-6)$$

把以上结果代入式(A－7－4),并经适当整理得

$$V_o=\frac{R_f}{R_{G1}+R_s}\left[\frac{R_{G1}+R_s+R_f}{R_{G2}+R_s+R_f}E_{S2}-E_{S1}\right] \qquad (A-7-7)$$

由于上式中 R_{G1} 和 E_{S1} 与温度有关,所以该式就是温度传感器电压－温度特性的数学表达式,只要电路参数和热敏元件 R_t 的电阻－温度特性已知,式(A－7－7)所表达的输出电压 V_o 与温度 t 的函数关系就完全确定.

2. 电压－温度特性的线化和电路参数的选择

一般情况下,式(A－7－7)表达的函数关系是非线性的,但通过适当选择电路参数可以使得这一关系和一直线关系近似. 这一近似引起的误差与传感器的测温范围有关. 设传感器的测温范围为 $t_1\sim t_3$,则 $t_2=(t_1+t_3)/2$ 就是测温范围的中值温度. 若对应 t_1、t_2 和 t_3 三个温度值,传感器的输出电压分别为 V_{o1}、V_{o2} 和 V_{o3}. 所谓传感器电压－温度特性的线性化就是适当选择电路参数使得这三个测量点在电压－温度坐标系中落在通过原点的直线上,即要求

$$V_{o1}=0,\ V_{o2}=V_{o3}/2,\ V_{o3}=V_3 \qquad (A-7-8)$$

在图 A－7－1a 所示的传感器电路中,需要确定的参数有七个,即 R_1、R_2、R_3、R_f 和 R_s 的阻值,电桥的电源电压 V_a 和传感器的最大输出电压 V_3,这些参数的选择和计算可按以下原则进行:

(1) 当温度为 t_1 时,电路参数应使得 $V_o=V_{o1}=0$,这时电桥应工作于平衡状

态和差分运放电路参数应处于对称状态，即要求 $R_1=R_2=R_3=R_{t1}$（热敏电阻在温度 t_1 时的阻值），但为了充分利用成品电阻元件，通常选取 $R_2=R_3=R_A$，$R_1=R_{t1}$，式中 R_A 为阻值最接近 R_{t1} 的电阻元件的系列值.

（2）为了尽量减小热敏电阻中流过的电流所引起的发热对测量结果带来的影响，V_a 的大小不应使 R_t 中流过的电流超过1 mA.

（3）传感器的最大输出电压 V_3 的值应与后面连接的显示仪表相匹配，例如在温度－电压变换电路后面接 8 位模数转换电路的计算机自动测温系统中，可根据变换系数为 50 mV/℃ 和测温范围（t_3-t_1）的值确定.

（4）最后两个电路参数 R_s 和 R_f 的值可按式（A－7－8）所表示的线性化条件的后两个关系式确定，即

$$V_{o3}=V_3=\frac{R_f}{R_{G13}+R_s}\left[\frac{R_{G13}+R_s+R_f}{R_{G2}+R_s+R_f}E_{S2}-E_{S13}\right]\qquad (A-7-9)$$

$$V_{o2}=\frac{V_3}{2}=\frac{R_f}{R_{G12}+R_s}\left[\frac{R_{G12}+R_s+R_f}{R_{G2}+R_s+R_f}E_{S2}-E_{S12}\right]\qquad (A-7-10)$$

其中 R_{G1i}、E_{S1i}（$i=1,2,3$）是热敏电阻 R_t 所处环境温度为 t_i 时按式（A－7－2）计算所得的 R_{G1} 和 E_{S1} 值. 当电桥各桥臂阻值、电源电压 V_a 和热敏电阻的电阻－温度特性以及传感器最大输出电压 V_3 已知后，在（A－7－9）、（A－7－10）两式中除 R_s、R_f 外其余各量均具有确定的数值，这样只要联立求解（A－7－9）、（A－7－10）两式就可求出 R_s 和 R_f 的值. 然而（A－7－9）、（A－7－10）两式是以 R_s 和 R_f 为未知数的二元二次方程组，其解很难用解析的方法求出，必须采用数值计算技术.

3. 确定 R_s 和 R_f 的数值计算技术

如前所述，方程（A－7－9）和（A－7－10）是以 R_s 和 R_f 为未知数的两个二元二次方程组，每个方程式在（R_s，R_f）直角坐标系中对应着一条二次曲线，两条二次曲线交点的坐标值即为这个联立方程组的解. 这个解可以利用迭代法求得. 由于在 $R_s=0$ 处与式（A－7－10）对应的曲线对 R_f 轴的截距较式（A－7－9）对应的曲线的截距大（由数值计算结果可以证明），因此为了使迭代运算收敛，首先令 $R_s=0$ 代入式（A－7－10），由式（A－7－10）求出一个 R_f 值，然后把这一 R_f 值代入式（A－7－9），并由式（A－7－9）求出一个新的 R_s 值，再代入式（A－7－10）……如此反复迭代，直到在一定的精度范围内可认为相邻两次算出的 R_s 和 R_f 值相等为止.

4. 非线性误差的理论分析

热敏元件电阻－温度曲线测定后和 V_a、V_3 及电路参数确定后，传感器由式（A－7－7）所表达的电压－温度特性的函数关系 $V_o(t)$ 就完全确定了，虽然在电路参数的选择上保证了与 t_1、t_2 和 t_3 对应的三个测量点在（V_o、t）平面上落在通

过原点的同一直线上，但在整个测温范围内，式(A－7－7)所表达的电压－温度特性不是一条直线，而是一条如图 A－7－2 所示的 S 形曲线. 在此情形下，若在传感器的输出端用刻度特性均匀的电压表头来显示温度值，就相当于用上述直线关系代替式(A－7－7)所表达的曲线关系. 除 t_1、t_2 和 t_3 三个温度值外，对于其余各点，这一替代均存在着由于传感器电压－温度特性的非线性引起的误差，随测温范围缩小，这一误差也会相应减小. 由于这种温度－电压变换电路常用于温度自动检测的计算机数据采集系统中，在此情况下，对温度传感特性曲线采用离散化和线性插值技术就能很准确实现对温度的自动检测.

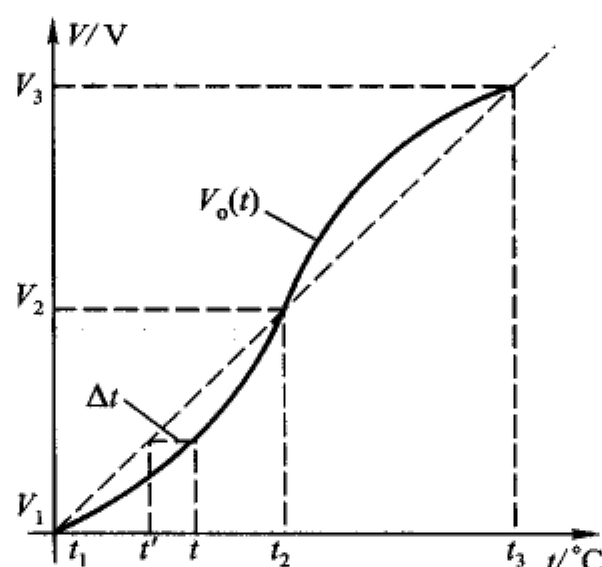


图 A－7－2 电压－温度特性及非线性误差

实验内容

本实验的主要设备是 TS－C 型温度传感技术实验仪，其电路原理图如图 A－7－3 所示，使用方法见该仪器的使用说明书. 该仪器配上数字万用表、磁力搅拌加热器、盛有变压器油的烧杯和水银温度计等简单器具就可方便地进行下面各项内容的实验：

1. 热敏电阻元件电阻－温度特性的测定

该项测量是设计本温度传感器的基础，要求测量结果在测量器具允许误差范围内尽量准确，为此在测量过程中应特别仔细、认真，尽量减少人为因素的影响. 测量时把热敏电阻固靠在 0～100 ℃水银温度计的头部后，把温度计及热敏元件浸入盛有变压器油的烧杯内，并用磁力搅拌加热器加热变压器油. 在 25～75 ℃的温度范围内，从 25 ℃开始，每隔 5 ℃用数字万用表测量这些温度下热敏电阻的阻值，直到 75 ℃止. 为了使测量结果更为准确，可在升温过程和降温过程中各测一次，然后取平均. 升温时，升温速度不宜过快. 该项测定完成后，采用直

线拟合方法处理实验数据，求出式(A－7－1)所表示的热敏电阻的电阻－温度特性中的材料常量 B_n 的实验值.

2. 选择和计算电路参数

首先根据实验测得的热敏电阻的电阻－温度特性曲线和测温范围(25～65 ℃)，按前面所论述的原则确定 R_1、R_2、R_3、V_a 和 V_3，然后把式(A－7－9)和式(A－7－10)改写成以下标准形式：

$$AR_s^2+BR_s+C=0 \quad (A,B,C\text{ 中含 }R_f) \qquad (A-7-9')$$

$$A'R_f^2+B'R_f+C'=0 \quad (A',B',C'\text{中含 }R_s) \qquad (A-7-10')$$

并用迭代法计算电路参数 R_s 和 R_f；然后，按式(A－7－7)和式(A－7－11)计算以上测温范围情况下传感器的电压－温度特性的理论值(计算程序自编).

3. 温度传感器的组装与调试

首先调节设置在 TS－C 型温度传感技术实验仪后面板上的多圈电阻器，使 R_1、R_2、R_3、R_s 和 R_f 的值为计算结果值(具体调节方法见TS－C型温度传感技术实验仪使用说明书)；然后调节传感器零点和校准量程，具体操作如下.

(1) 零点调节

调节图 A－7－3 所示电路中的 w_1(对应 TS－C 型温度传感技术实验仪前面板上的“V_a 调节”旋钮)使传感器的输入桥式电路的电源电压 V_a 为设计时的选定值，然后用 ZX21 型电阻箱代替热敏元件 R_t 接入传感器电路，并把电阻箱的阻值调至 R_{t1}(即热敏元件在 t_1 时的阻值)，用数字万用表 200 mV 挡观测传感器的输出电压 V_o 是否为零，若不为零，调节图 A－7－3 中的 R_1 使 V_o 值为零(允许 ±1 mV 的误差).

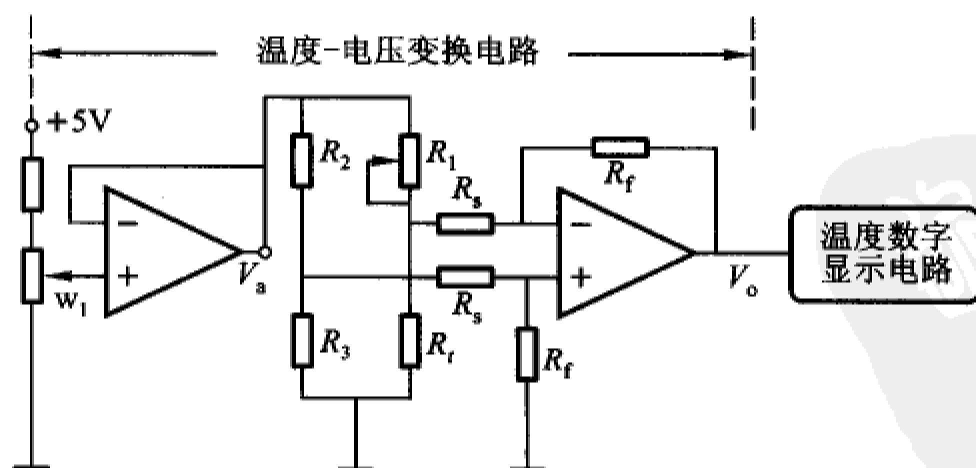


图 A－7－3 TS－C 型温度传感技术实验仪电路原理图

(2) 量程校准

完成零点调节后，把代替热敏电阻的电阻箱阻值调至 R_{t3}(即热敏元件在 t_3

时的阻值），用数字万用表观测传感器输出电压 V_o 是否为设计时所要求的 V_3 值. 如果不是，再次调节 w_1 改变电桥电源电压 V_a，使 $V_o = V_3$. 在完成以上调节工作后，注意保持仪器各调节旋钮位置不变.

4. 传感器电压－温度特性的测定

把测温范围分成 10 个等间隔的子温区，加热变压器油，当温度计示值低于 t_3 约 5 ℃时就停止加热（但不停止搅拌），由于加热器有余热，变压器油的温度会继续升高，当温度计示值高于 t_3 的某一最高温度后，变压器油便处于降温状态. 在降温过程中，测量和记录下以上各子温区交界点温度对应的传感器输出电压 V_o 值，并与按式（A－7－7）计算的理论值列表进行比较.

5. 温度的数字显示

为了用数字万用表的 200 mV 挡实现起始温度 t_1 及测温范围 $t_1 \sim t_3$ 内温度传感器温度的数字显示，在 200 mV 数字表头和图 A－7－3 所示的温度－电压变换电路之间需设置一个处理电路，试根据模拟电子线路理论自行设计一个具有这种功能的处理电路并拟定出相应的调试步骤.

数据处理

1. 根据实验数据在直角坐标纸上绘出 R_t 的电阻－温度特性曲线；并在同一坐标纸上绘出根据实验求出的 B_n 值由式（A－7－1）表示的特性曲线.

2. 在同一直角坐标系中绘出电压－温度特性的理论计算曲线和实验测定曲线.

3. 对实验结果进行分析、讨论和评定.

思考题

1. 用迭代法计算 R_s 和 R_f 时，若先给 R_f 赋值，计算过程将如何发展？

2. 在调节温度传感器的零点和量程时，为什么要先调节零点，后调节量程？

参考文献

［1］ 牛德芳. 半导体传感器原理及应用. 大连：大连理工大学出版社，1993

实验 A－8 半导体光电二极管伏安特性的测定

目的

1. 了解光电二极管结构及工作原理；
2. 熟悉光电二极管的基本性能；
3. 学习光电二极管伏安特性的测试技术；
4. 掌握光电二极管在光电转换技术中的正确使用方法.

仪器和用具

MOE－B 型半导体电光/光电器件基本特性测试仪、ZX21 型旋转式电阻箱.

原理

半导体光电二极管在光测技术、光纤通信、自动检测和自动控制等技术领域中应用十分广泛，现就它的基本结构、工作原理、伏安特性及其测量技术等问题论述如下：

1. 结构及工作原理

半导体光电二极管与普通的半导体二极管一样，都具有一个 P－N 结，但光电二极管在外形结构方面有它自身的特点，这主要表现在光电二极管的管壳上有一个能让光射入其光敏区的窗口. 此外，与普通二极管不同，它经常工作在反向偏置电压状态[如图 A－8－1(a)所示]或无偏压状态[如图 A－8－1(b)所示]. 在反向偏置电压状态下，P－N 结的空间电荷区的势垒增高，宽度加大，结电阻增加，结电容减小，所有这些均有利于提高光电二极管的高频响应性能. 无光照时，反向偏置的 P－N 结只有很小的反向漏电流，称为暗电流. 当有光子能量大于 P－N 结半导体材料的带隙宽度 E_g 的光波照射到光电二极管的管芯时，P－N 结各区域中的价电子吸收光能后将挣脱价键的束缚而成为自由电子，与此同时也产生一个自由空穴，这些由光照产生的自由电子空穴对统称为光生载流子. 在远离空间电荷区(亦称耗尽区)的 P 区和 N 区内，电场强度很弱，光生载流子只有扩散运动，它们在向空间电荷区扩散的途中因复合而消失掉，故不能形成光电流. 形成光电流的则主要靠空间电荷区的光生载流子，因为在空间电荷区内

电场很强，在此强电场作用下，光生自由电子空穴对将以很高的速度分别向N区和P区运动，并很快越过这些区域到达电极，沿外电路闭合形成光电流，光电流的方向是从二极管的负极流向正极，并且在无偏电压短路的情况下与入射的光功率成正比．因此在光电二极管的P-N结中，增加空间电荷区的宽度对提高光电转换效率有着密切关系．为此目的，若在P-N结的P区和N区之间再加一层杂质浓度很低以致可近似为本征半导体（用I表示）的I层，就形成了具有P-I-N三层结构的半导体光电二极管，简称PIN管，PIN光电二极管的P-N结除具有较宽的空间电荷区外，还具有很大的结电阻和很小的结电容，这些特点使得PIN管在光电转换效率和高频响应特性等方面与普通光电二极管相比均得到了很大改善．

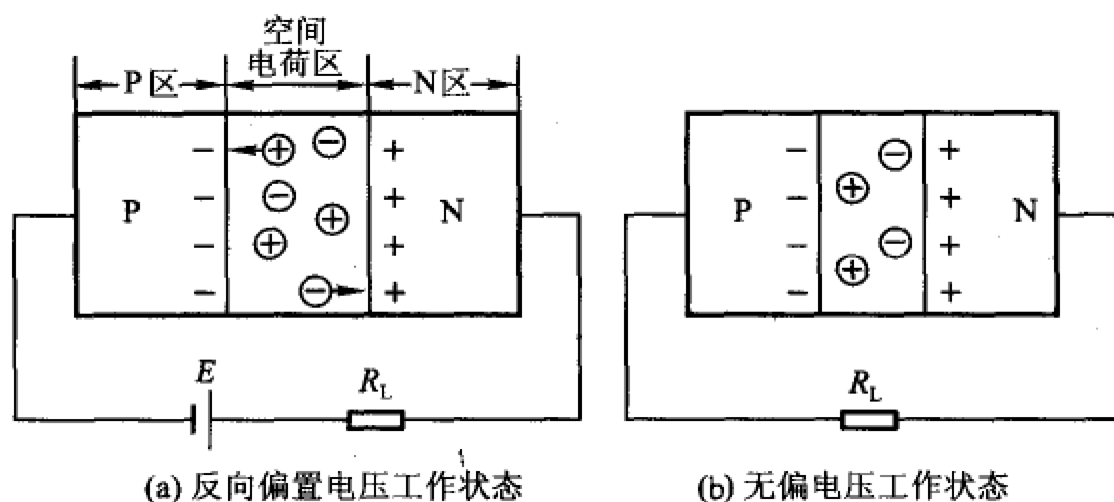


图 A-8-1 光电二极管的结构及工作方式

2．光电二极管的伏安特性

根据文献[1]，光电二极管的伏安特性可用下式表示：

$$I = I_0[1 - \exp(eV/kT)] + I_L \tag{A-8-1}$$

其中 I_0 是无光照的反向饱和电流，V 是二极管的端电压（正向电压为正，反向电压为负），e 为电子电荷，k 为玻耳兹曼常量，T 是结温，单位为K，I_L 是无偏电压状态下光照时的短路电流，它与光照时的光功率成正比．式（A-8-1）中的 I_0 和 I_L 均是反向电流，即从光电二极管负极流向正极的电流．根据式（A-8-1），光电二极管的伏安特性曲线如图A-8-2所示．对应图A-8-1(a)所示的反偏工作状态，光电二极管的工作点由负载线与第三象限伏安特性曲线的交点确定；对应图A-8-1(b)所示的无偏电压工作状态光电二极管的工作点由负载线与第四象限的伏安特性曲线交点确定．由图A-8-2可以看出：

（1）光电二极管即使在无偏电压或反向偏电压的工作状态下，也有反向的光电流流过，这与普通二极管只具有单向导电性相比有着本质的差别，认识和熟

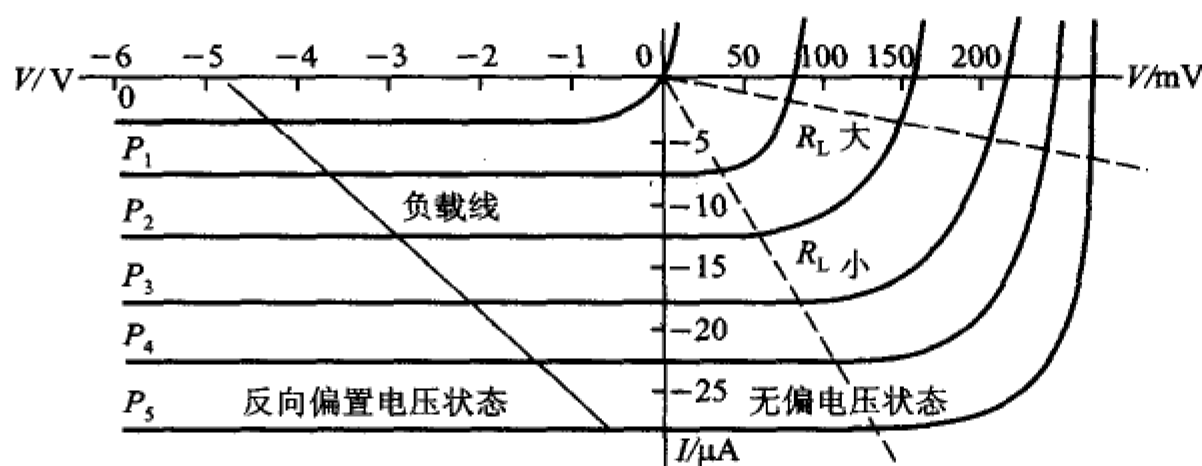


图 A－8－2　光电二极管的伏安特性曲线及工作点的确定

悉光电二极管的这一特点对于在光电转换技术中正确使用光电器件具有十分重要意义；

（2）反向偏电压工作状态下，在外加电压 E 和负载电阻 R_L 的很大变化范围内，光电流与入照的光功率均具有很好的线性关系；无偏电压工作状态下，只有 R_L 较小时光电流才与入照光功率成正比，R_L 增大时，光电流与光功率呈非线性关系. 无偏电压状态下，短路电流与入照光功率的关系称为光电二极管的光电特性，这一特性在 $I-P$ 坐标系中的斜率

$$R \equiv \Delta I/\Delta P(\mu A/\mu W) \qquad (A-8-2)$$

定义为光电二极管的响应度，这是宏观上表征光电二极管光电转换效率的一个重要参数.

（3）在光电二极管处于开路状态的情况下，光照时产生的光生载流子不能形成闭合的光电流，它们只能在 P－N 结空间电荷区的内电场作用下，分别堆积在 P－N 结空间电荷区两侧的 N 层和 P 层内，产生外电场，此时光电二极管表现出具有一定的开路电压. 不同光照情况下的开路电压，就是伏安特性曲线与横坐标轴交点所对应的电压值，由图 A－8－2 可见，光电二极管的开路电压与入照光功率也是呈非线性关系.

（4）由于反向偏置电压状态下的光电二极管在很大的动态范围内，其光电流与偏电压和负载电阻几乎无关，故在入照光功率一定时它可被视为一个恒流源；而在无偏电压工作状态下，光电二极管的光电流随负载电阻变化很大，此时它不具有恒流源性质，只起光电池作用.

光电二极管响应度 R 的值与入照光波的波长有关. 本实验中采用的硅光电二极管，其光谱响应波长在 0.4 ~ 1.1 μm 之间；峰值响应波长在 0.8 ~ 0.9 μm 范围内. 在峰值响应波长下，响应度 R 的典型值在 0.25 ~ 0.5 A/W 的范围内.

3. 光电二极管伏安特性的测量方法

测试光电二极管在第三象限内伏安特性的电路如图 A-8-3 所示. 图中 SPD 为硅光电二极管. LED 是发光中心波长与被测光电二极管的峰值响应波长很接近的 GaAs 半导体发光二极管,此处它仅作光源使用,其光功率由称为尾纤的光导纤维输出. 由 IC1 为主构成的电路是一个电流-电压变换电路,它的作用是把流过光电二极管的反向电流 I 转换成由 IC1 输出端 c 点对反相输入端 b 点间的电压 V_{cb}(当图 A-8-3 中的开关 S 掷向 B 测时). 整个测试电路的工作原理依据如下:由于 IC1 的反相输入端具有很大的输入阻抗,光电二极管受光照时产生的光电流几乎全部流过反馈电阻 R_4 并在其上产生电压降 $V_{cb}=R_4I$. 另外,又因 IC1 具有很高的开环电压增益,反相输入端与同相输入端对地的电压几乎相等,故

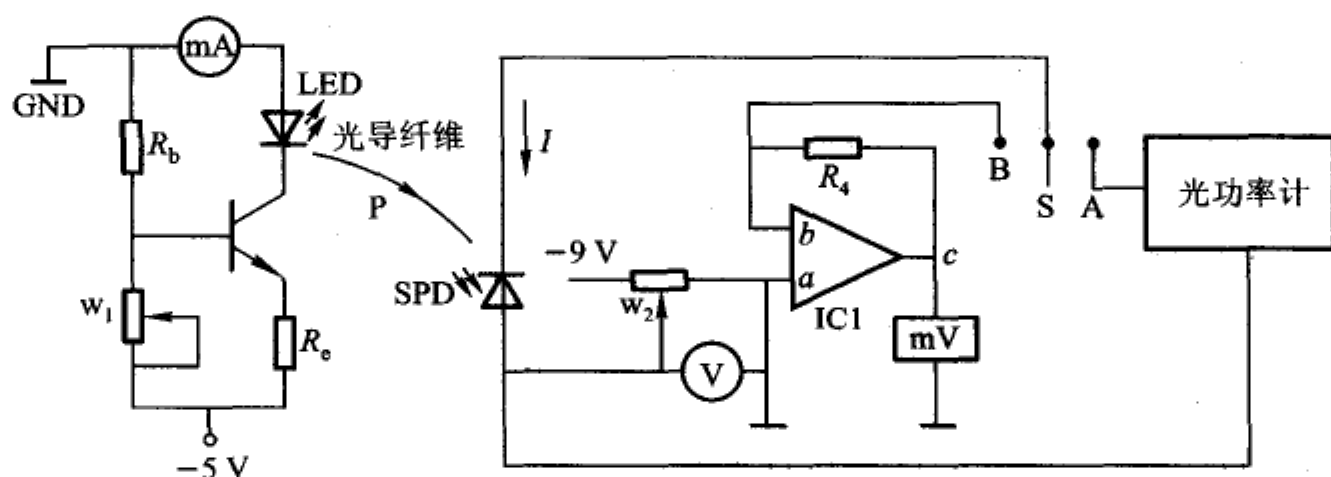


图 A-8-3 光电二极管第三象限伏安特性的测定

$$V_o = V_c - V_a = V_{ca} = R_4 I \qquad (A-8-3)$$

已知 R_4 后,就可根据上式由 V_o 计算出相应的光电流 I.

具体操作步骤是:先把图 A-8-3 中的开关 S 掷向 A 侧,调节 w_1 使光功率计有 5 μW 读数,然后保持 w_1 旋钮的位置不变,把 S 掷向 B 侧,调节 w_2,使电压表 V 的读数从零逐渐增加,每增加 1 V 读取一次 V_o 值,直到反压增加到 8 V 止. 然后又把开关 S 掷向 A 侧,继续调节 w_1,在光功率计读数每增加 5 μW 的情况下重复以上测量……,直到作为参数的光功率值为 30 μW 为止。

光电二极管第四象限伏安特性曲线的测试电路如图 A-8-4 所示. 在测完一条第三象限的伏安特性曲线后,保持 LED 驱动电流不变,调节图 A-8-4 电路中的电阻箱 R_L(即改变光电二极管的负载电阻)使光电二极

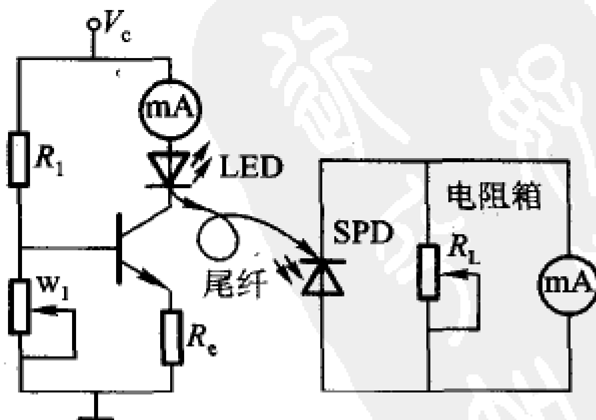


图 A-8-4 光电二极管第四象限伏安特性曲线的测定

管的端电压从 0 开始逐渐增加，每增加一适当值，记录下相应的 R_L 值. 在数字电压表内阻比 R_L 大很多的情况下，则可由关系式 $I=V/R_L$ 算出相应的光电流 I.

实验内容

以下实验内容所需的仪器和设备除 ZX21 型电阻箱外，其余部分均包括在 MOE－B 型半导体电光/光电器件基本特性测试仪中，有关该仪器的使用方法见其说明书.

1. LED 电光特性曲线的测定

LED 的电光特性是指其输出光功率 P 与工作电流 I_D 之间的关系，其测量电路如图 A－8－5 所示. 测量前首先进行 LED 尾纤与光功率计探头间最佳光耦合的调节. 然后调节图 A－8－5 电路中的 w_1，使工作电流从 0～50 mA 逐渐增加，每增加 5 mA 读取一次光功率计的示值. 根据测量数据，描绘 LED 的电光特性曲线.

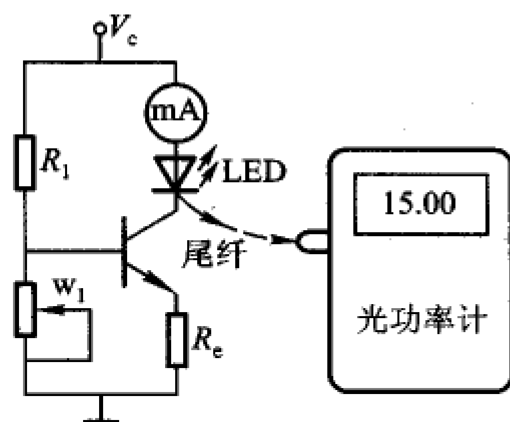


图 A－8－5 LED 电光特性的测定

2. 测定光电二极管的伏安特性曲线

测量光电二极管在 0、5、10、15、20、25 和 30 μW 七种光照情况下的伏安特性曲线。测量前首先需进行 LED 尾纤与被测光电二极管间最佳光耦合的调节. 对于每条曲线，先按图A－8－3所示的电路进行第三象限内线段的测量，在测完这条线段后，保持 LED 的驱动电流 I_D 不变，按图 A－8－4 所示电路和前面所述的方法测量同一曲线的第四象限内的线段.

数据处理

根据实验数据描绘被测光电二极管在第三、四象限内的以上六条伏安特性曲线及光电特性曲线，并由光电特性曲线计算出被测光电二极管在 LED 发光波长下的响应度 R 的值.

思 考 题

1. 在正向偏压状态下，光电二极管受光照时有无光电流产生？为什么光电二极管不能像普通二极管那样，工作在正向偏置电压状态？

2. 能否用通常的伏安法测定光电二极管的伏安特性？

3. 为什么不把图 A－8－3 中的电压表 V 接于光电二极管的两端对其偏置电压进行直接测量？

参考文献

[1] 吕斯骅，朱印康. 近代物理实验技术(Ⅰ). 北京：高等教育出版社，1991

实验 A－9 密立根油滴实验

目的

1. 测量微小油滴上的电荷；
2. 分析大量电荷的值，得出如下的认识：
(1) 电荷是分立的；
(2) 存在最小电荷.

仪器和用具

密立根油滴实验仪（附直流高压电源、数字电压表、秒表）、喷油器.

密立根油滴实验仪如图 A－9－1 所示，其主体部分是油滴室和显微镜. 油

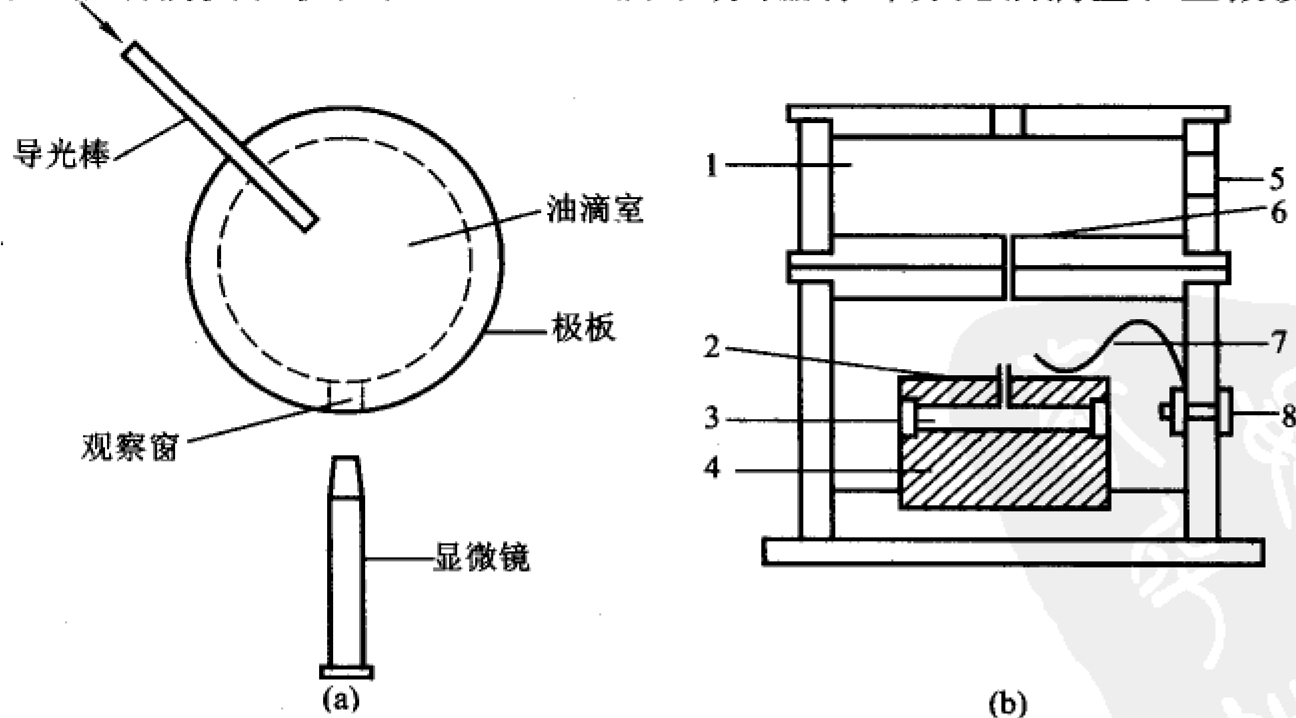


图 A－9－1

1——油雾室；2——上电极；3——油滴室；4——下电极；5——喷油口；6——油雾孔；7——上电极压簧；8——上电极插孔

滴室是由上、下二极板构成的电容器，上极板的中间有个小孔，喷油器喷出的油雾由小孔落入油滴室. 在二极板间的绝缘部分开有两个窗口，一个窗口用以照明油滴，另一窗口用以观测油滴运动.

油滴室的上、下极板和直流电源的输出相接，在油滴仪上有一电路控制开关S，它有三个控制位置，直立在中间时为断路，油滴室中电场为零，油滴做自由落下运动；开关S倒向上或下侧时为通路，倒向上或向下的区别是极板的极性反转，当上极板带电符号与油滴带电符号相反时，油滴可在电场中向上运动.

及时、正确转换控制开关S，对此实验十分重要，在实验开始时应先练习其操作.

原理

测量油滴的不同电荷 $q_1, q_2, \cdots, q_m$，从各电荷值的差异去分析存在最小电荷，即各电荷 q_i 均为此最小电荷的整数倍，亦即各电荷之比为一简单整数比：

$$q_1 : q_2 : \cdots : q_m = n_1 : n_2 : \cdots : n_m \ (n_i \text{ 为整数})$$

实际上由于测量不确定度，不可能得出理想的整数比，但是考虑测量不确定度之后，应成立简单整数比，由此可求出最小电荷及其测量不确定度.

1. 油滴电荷 q 的测量

q 的测量（图 A－9－2）有动态法和平衡法.

设油滴半径为 r，所带电荷为 q，在电场 E 中的上升速度为 $v_上$，又设电场力和重力平行、方向相反，油滴是沿铅直方向上升，这时作用在油滴上的力有4个，它们是：

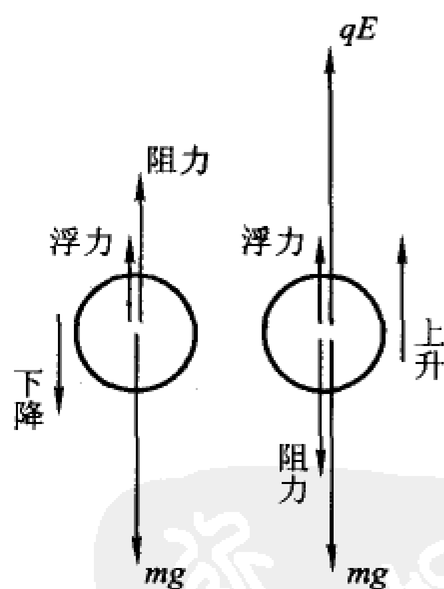


图 A－9－2

（1）重力 $mg = \dfrac{4}{3}\pi r^3 \rho g$，$\rho$ 为油的密度，g 为当地重力加速度.

（2）电场力 $qE = q\dfrac{U}{d}$，U 为油滴室极板间电压，d 为极距.

（3）空气浮力 $\dfrac{4}{3}\pi r^3 \rho' g$，$\rho'$ 为空气密度.

（4）空气对运动油滴的粘性阻力为 $6\pi r \eta v$（流体力学的斯托克斯公式），η 为空气的粘度，v 为油滴运动速度.

当油滴在电场中向上运动时，（1）、（4）力的方向向下，（2）、（3）力的方向向上. 由于油滴的半径 r 很小（≈ 0.001 mm），在粘性流体中运动很短的距离

（≈0.001 mm）就可达到终极速度，所以可认为在油滴室中运动的油滴是匀速的[2].

动态法 利用油滴在电场中的上升运动，测量油滴上所带电荷 q. 此时上述 4 力处于平衡状态，即

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho g+6\pi r\eta v_{上}=q\frac{U}{d}+\frac{4}{3}\pi r^3\rho' g \tag{A-9-1}$$

由此得出

$$q=\left[\frac{4}{3}\pi r^3(\rho-\rho')g+6\pi r\eta v_{上}\right]\frac{d}{U} \tag{A-9-2}$$

式中 ρ、ρ'、g、η 和 d 为已知值，U 和 $v_{上}$ 为实验时测定值，只有 r 较难测量，这是因为 r 很小而又必须在运动中去测量.

平衡法 利用在一定的电场中，使带电的油滴悬停在油滴室中去测量 q，此时因油滴不运动，没有粘性力，是 3 力平衡，即

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho g=q\frac{U'}{d}+\frac{4}{3}\pi r^3\rho' g \tag{A-9-3}$$

由此可得

$$q=\frac{4}{3}\pi r^3(\rho-\rho')g\frac{d}{U'} \tag{A-9-4}$$

式中 U' 为使油滴悬停在空中所加的电压.

2. 油滴半径 r 的测量

当油滴室中电场为零，油滴做匀速下落速度为 $v_{下}$ 时，这时电场力为零，粘性力的方向改为向上，处于 3 力平衡状态，即

$$\frac{4}{3}\pi r^3\rho g=6\pi r\eta v_{下}+\frac{4}{3}\pi r^3\rho' g$$

上式两侧除以 r^3，再做变换，可得

$$r^2=\frac{6\pi\eta v_{下}}{\frac{4}{3}\pi(\rho-\rho')g}$$

则

$$r=\sqrt{\frac{9\eta v_{下}}{2(\rho-\rho')g}} \tag{A-9-5}$$

在下面将讨论，此式中的 η 应代以修正后的 η'

3. 电荷 q 的最后表达式

将式（A－9－5）代入式（A－9－2），整理后可得

$$q=\frac{18\pi d}{\sqrt{2(\rho-\rho')g}}\eta^{3/2}(v_{下}+v_{上})\frac{\sqrt{v_{下}}}{U} \qquad (A-9-6)$$

在以上讨论粘性力作用时，根据的是流体力学的斯托克斯公式，而该公式适用于连续介质的情况，现在是很小的油滴在密度不大的气体中运动，已偏离连续介质的条件. 密立根研究了这个问题后，他在计算空气的粘度时加了一补正项，即上述公式的空气粘度应取补正后的 η'：

$$\eta'=\frac{\eta}{1+\frac{b}{pr}} \qquad (A-9-7)$$

式中 p 为大气压（单位为 Pa），r 为油滴半径（单位为 m）.

将式（A－9－6）中的 η 代以式（A－9－7）的 η' 又将 $v_{上}$ 和 $v_{下}$ 代以 $s/t_{上}$ 和 $s/t_{下}$，s 为油滴运动路程，$t_{上}$ 和 $t_{下}$ 为上升和下落时通过 s 的时间，得动态法的最后测量公式为

$$q=\frac{18\pi d}{\sqrt{2(\rho-\rho')g}}\left(\frac{s\eta}{1+b/(p\cdot r)}\right)^{3/2}\left(\frac{1}{t_{上}}+\frac{1}{t_{下}}\right)\frac{1}{\sqrt{t_{下}}U}. \qquad (A-9-8)$$

式中 b 为常量，r 值可用由式（A－9－5）求出的近似值.

将式（A－9－5）、（A－9－7）代入式（A－9－4），$v_{下}$ 代以 $\frac{s}{t_{下}}$，整理后可得平衡法测 q 的最后表达式为

$$q=\frac{18\pi d}{\sqrt{2(\rho-\rho')g}}\left(\frac{\eta}{1+\frac{b}{p\cdot r}}\right)^{3/2}\left(\frac{s}{t_{下}}\right)^{3/2}\frac{1}{U'} \qquad (A-9-9)$$

实验内容

1. 实验的准备

(1) 油滴仪上的电压表用数字电压表，以减小仪表引入的不确定度.

(2) 检测油的密度 ρ.

(3) 检测显微镜中网格形分划板（以下称网格板）的位置.

实验时显微镜的物镜将油滴的像成在网格板上. 按设计，网格板的 4 个格对应油滴处的实际距离为 2 mm（$s=2$ mm），如果网格板的位置不准，则 4 个格将不对应 2 mm. 取下显微镜进行检验，如网格板的位置不准要进行调整.（要自己设计检验）.

(4) 用水准器检验油滴室的极板是否水平，如有偏离应调整.（问：不水平

有何影响？）

（5）调节照明

将控制开关 S 立在中间，使油滴室中电场为零，将一细铜丝插入上极板正中的小孔中，用显微镜观察铜丝，调节照明使看到的铜丝的亮度最大，但背景要暗一些.

2．选择油滴

此实验的效果如何，关键在于能否比较准确地测出 q 值较小、相互差异也较小的一系列 q_i 值，否则在分析时将遇到困难.

一般是选取自由落下较慢，并在加 400 V 左右电压的电场中上升也较慢的油滴，这样的油滴由于较小较暗，观测时要费些力.

喷一次油可得大量带电的油滴，用控制开关 S，反复改变电场的方向进行筛选，控制好瞄准的油滴使其他的油滴落到极板上.

实验之初，可选一比较好观测的油滴，比如自由落下通过 4 格的时间在 15 s 左右，在加 300 V 电压的电场中，上升 4 格的时间在 10 s 左右，以后逐渐选择运动更慢的油滴.

3．探索不同的电荷

从重复喷油的油雾中去筛选.

4．测量时的注意事项

（1）每一油滴的下落时间 $t_{下}$ 和上升时间 $t_{上}$ 都要重复测几次（运动距离均为 4 格）.

（2）要记录每一油滴上升时所加的电压 U.

（3）要记录实验室的大气压 p（单位为 Pa）和室温 t（单位为℃）.

（4）此实验是通过统计来分析基本电荷，测量时在尽量测准每一电荷的情况下，要努力探测小的 q 和与 q 相差不大的一系列 q_i（这一点非常重要）.

（5）在测量中途，有时眼睛要短时离开显微镜，为了不使油滴丢失，可临时调低电压，使油滴悬浮在空气中.

数据处理

1．计算电荷值 q

按式（A－9－8）或（A－9－9）计算，其中的常量取值为

$$d=5.00\times10^{-3}\ \mathrm{m},\ s=2.00\times10^{-3}\ \mathrm{m},\ \rho'=1.2\ \mathrm{kg/m^3},$$

$$\eta=1.83\times10^{-5}\ \mathrm{kg/(m\cdot s)},\ b=8.23\times10^{-3}\ \mathrm{m\cdot Pa}$$

下述实验例是动态法的一组测量值,进行测量时的实验条件为

$$g=9.805\ \mathrm{m/s^2},\ \rho=981\ \mathrm{kg/m^3},\ p=1.002\times10^5\ \mathrm{Pa}$$

将各油滴测出的 $U(\mathrm{V})$、$t_上(\mathrm{s})$ 及 $t_下(\mathrm{s})$ 一并代入,算出的 q 值列在表 A-9-1 中.

表 A-9-1 实验例

顺序	1	2	3	4	5	6	7	8
$q/(10^{-19}\mathrm{C})$	9.56	3.19	7.92	17.32	14.50	11.21	4.78	9.53
顺序	9	10	11	12	13	14	15	
$q/(10^{-19}\mathrm{C})$	3.07	4.75	14.34	8.03	9.34	14.77	3.43	

2. 分析各 q 值中包含基本电荷的数目 n

如图 A-9-3 所示,将各 q 值标在一坐标轴上. 从图上明显看出,15 个 q 值分别集中为 7 组,结合 q 值的不确定度分析可知,各组中 q 值的差异是测量误差造成的,电荷的分立性显示得很明显. 各组分别取平均值,则为表 A-9-2.

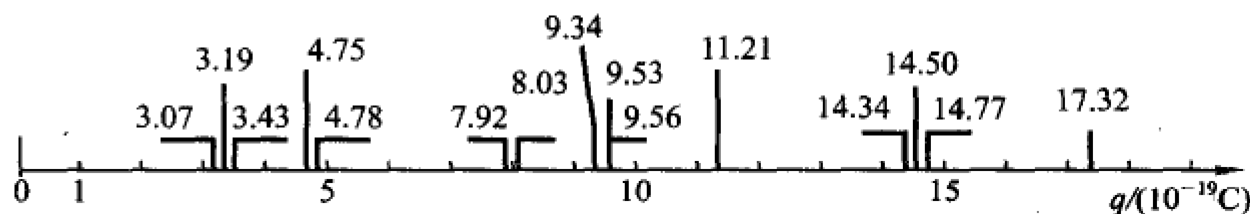


图 A-9-3

表 A-9-2 实验例

$q/(10^{-19}\mathrm{C})$	3.23	4.77	7.98	9.48	11.21	14.54	17.32

由于元电荷的值不能大于上列 q 的最小值,不能大于相邻 q 值之差的最小值. 可据此给出元电荷的估计值 $\hat{e}$,求出 $\hat{n}_i=\frac{q_i}{\hat{e}}$,此 $\hat{n}_i$ 值均应当接近整数,而且是一列简单整数比,参照此 $\hat{n}_i$ 值,给各 q_i 值一个整数 n_i,可求出 e 的测量值. 按此思路去分析,并利用全部数据给出最后的结果. 最后求结果,可以用图解法或最小二乘法.

q 值的个数少时,分析将有困难,可将几个人的测量值综合一起去分析,但要注明数据来源.

问题与分析

如果测出 $q_1, q_2, q_3, \cdots$ 若干电荷值之后,用已知的 e 值去除,得 $n_1, n_2, n_3, \cdots$,这样是否降低此实验的意义?

参考文献

[1] 谢邦同. 油滴实验. 物理实验,1982,2(4):185—188

[2] 史志强. 油滴实验方法的研究. 物理实验,2002,22(6):29—32

实验 A－10 压电陶瓷的压电常量的测量

目的

迈克耳孙干涉仪是一种典型的干涉测量装置,这种测量装置在现代精密测量与控制技术中有许多重要的应用. 本实验要求学生自己设计光路,选择必要的光学元件,动手在防震台上组装迈克耳孙干涉仪,仔细调节光路,直至在观察屏上观察到清晰的 He－Ne 激光产生的圆形干涉条纹.

其次要求利用组装的迈克耳孙干涉仪观察研究压电陶瓷的逆压电效应,测定压电陶瓷的压电常量.

仪器和用具

全息防震台、He－Ne 激光器、分束器、反射镜、毛玻璃屏、扩束器、直流电源(0～1 000 V)、数字电压表(0～2 000 V)、电位器(500 kΩ,2W)、圆管形待测压电陶瓷样品 1～2 只、磁性座及若干光学元件夹具.

原理

压电效应:1880 年,居里兄弟(J. Curie 和 P. Curie)在研究热电现象和晶体对称性的时候,发现在石英单晶切片的电轴方向施加机械应力时,可以观测到在

垂直于电轴的两个表面上出现大小相等、符号相反的电荷;此后,在 1881 年,居里兄弟又发现了前者的逆效应,即在上述晶体相对表面施以外加电场时,在该晶体垂直于电场的方向上产生应变和应力.通常把上述的现象称为压电效应,前者称为正压电效应,后者则称为逆压电效应.

具有压电效应的物体称为压电体.现已发现具有压电特性的多种物体,其中有单晶、多晶(多晶陶瓷)及某些非晶固体.本实验选用的待测样品是一种圆管形的压电陶瓷,其外形和结构如图A-10-1所示,它由锆钛酸铅[$Pb(Zr、Ti)O_3$]制成,圆管的内外表面镀银,作为电极,接上引出导线,就可对其施外加电压.实验表明,当在它的外表面加上电压(内表面接地)时,圆管伸长,反之,加负电压时,它就缩短.

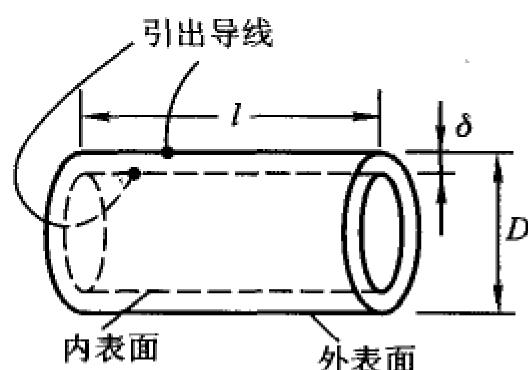


图 A-10-1

设用 E 表示圆管内外表面加上电压后,在内外表面间形成的径向电场的电场强度,用 ε 表示圆管轴向的应变,α 表示压电陶瓷在准线性区域内的压电常量,于是

$$\varepsilon = \alpha E \qquad (A-10-1)$$

严格讲 α 应写为 d,并应标明下标,表示电场方向和应变方向,由于样品是一圆管,大体上相当于 d_{31}.

若压电陶瓷的长度为 l,加在压电陶瓷内外表面的电压为 V,加电压后,长度的增量为 Δl,圆管的壁厚为 δ(均以 mm 为单位),则按式(A-10-1),有

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha \frac{V}{\delta} \qquad (A-10-2)$$

所以

$$\alpha = \frac{\Delta l \delta}{lV} \qquad (A-10-3)$$

在压电常量的表达式中,δ、l 可以用游标卡尺直接测量,电压 V 可由数字电压表读出,由于所加的电压变化时,长度 l 的变化量 Δl 很小,无法用常规的长度测量方法解决,所以必须采用光干涉测量的方法,由组装的迈克耳孙干涉仪进行测量.

图 A-10-2 为用组装的迈克耳孙干涉仪测量压电陶瓷加电压后产生的微小长度变化 Δl 的装置示意图.图中 G_1 为分光板,G_2 为补偿板,M_1 和 M_2 分别为动镜和固定镜,以上光学元件均由磁性座及光学夹具固定安置在防震平台相应

的位置上．如果组装的迈克耳孙干涉仪已调好，观察者可在观察屏 P_0 上看到同心圆干涉条纹．当改变加在压电陶瓷上的电压时，两相干光的光程差发生改变，就可观测到屏上的同心圆干涉条纹在涨出（或缩进），涨出（或缩进）的干涉条纹的数目 n 和圆管长度的变化 Δl 的关系如下：

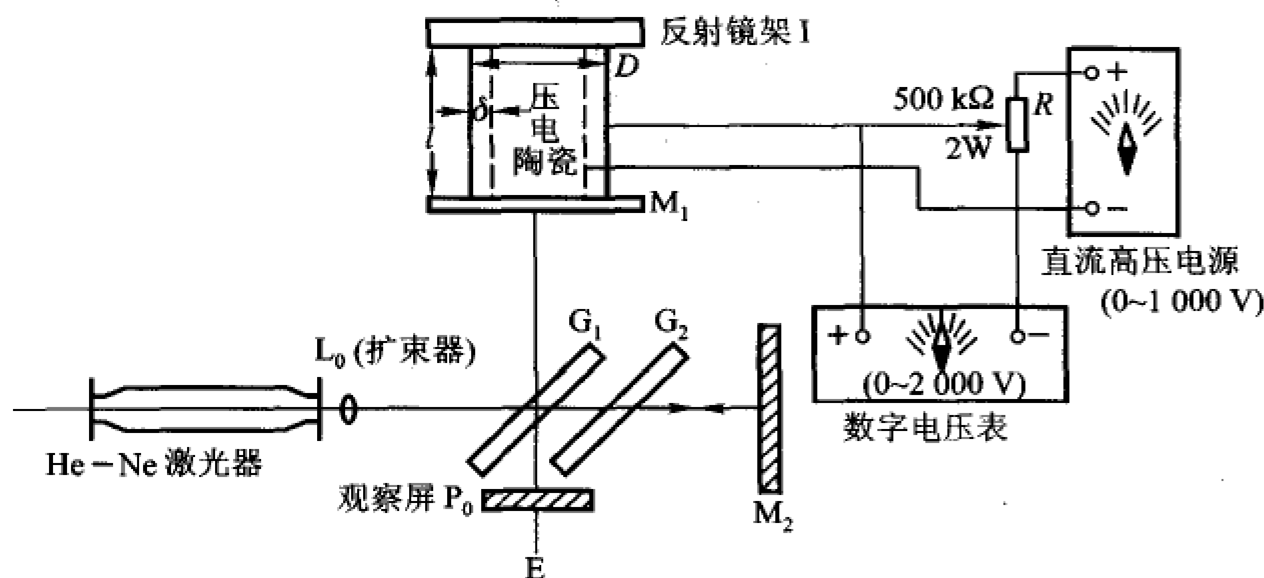


图 A－10－2

$$\Delta l = n\frac{\lambda}{2} \qquad (A-10-4)$$

式中，λ 为 He－Ne 激光波长，n 为条纹涨出（或缩进）的数目．把式（A－10－4）代入（A－10－3），整理后可得

$$n = \left[\frac{2l\alpha}{\lambda\delta}\right]\cdot V \qquad (A-10-5)$$

根据上式．若认为 n 和 V 存在线性相关，则待求的压电常量 α 即可由上述回归方程的斜率 b 求得，即

$$b = \frac{2l\alpha}{\lambda\delta} \qquad (A-10-6)$$

这里需要指出的是，涨出（或缩进）的条纹数 n 并不随电压 V 作线性变化，仅是在某一电压范围内具有准线性的特性，图 A－10－3表示出了 n 和电压变化的关系．本实验要求出样品在准线性区的压电常量．

实验内容

1．利用提供的光学元器件在防震平台上组装迈克耳孙干涉仪．在调整光路时，必须仔细调节各光学元件的同轴等高．由于 He－Ne 激光器的相干长度较

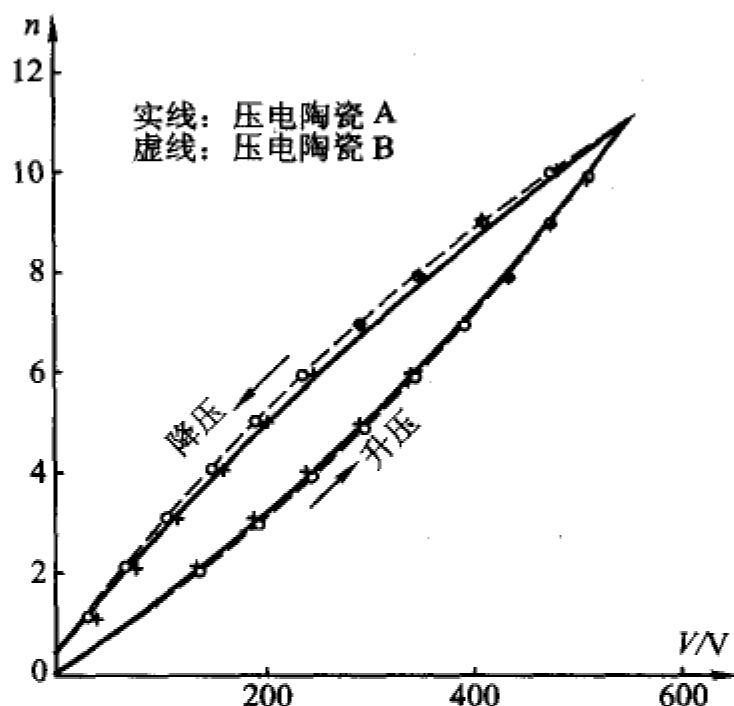


图 A－10－3

长，在图 A－10－2 的光路中，可以省略补偿板 G_2.

2. 关于压电陶瓷圆管的安装，可把组装用的动镜 M_1 粘在压电陶瓷圆管的一端，压电圆管的另一端再粘在反射镜架上. 注意装拆中要保证不损伤动镜的光学平面.

3. 观测压电陶瓷的逆压电效应，作出压电陶瓷的 $n-V$ 曲线. 测量时，要求加到压电陶瓷的电压由 0 V 慢慢增加到约 600 V，再逐步降低到 0 V，同时记录每当中心涨出（或缩进）一环的电压值. 最后，根据实验数据，作出 $n-V$ 曲线，用线性回归法求准线性区域的压电常量. 测量中，要缓慢地增加电压，等到条纹稳定后再读数. 电压逐渐减小时，再读一次数.

[附注]　压电陶瓷的应用

如图 A－10－4 所示为 HTD27A－1 压电陶瓷片，如在它两个电极（一为金属片，一为镀银层）上加一振荡电压时，交变的电信号使压电陶瓷带动金属片一起产生机械振动，因而发出声音. 利用这一点可以将压电陶瓷片作高音扬声器，这在录音机里普遍使用. 如果将压电陶瓷片放在一振荡电路里可做成蜂鸣器，这在遥控接收器、电脑、数码相机、电子表里经常用到. 如果将压电陶瓷做成各种特定谐振频率的器件，又可作为陶瓷滤波器，这在电视机伴音电路里得到广泛应用. 压电陶瓷还可作超声波换能器，用作超声波清洗、声速测定等（图 A－10－5）.

由于压电陶瓷具有可逆性，即给它机械振动，在两极产生交变电压，因此压电陶瓷片又可作声音传感器，如图 A－10－6 所示.

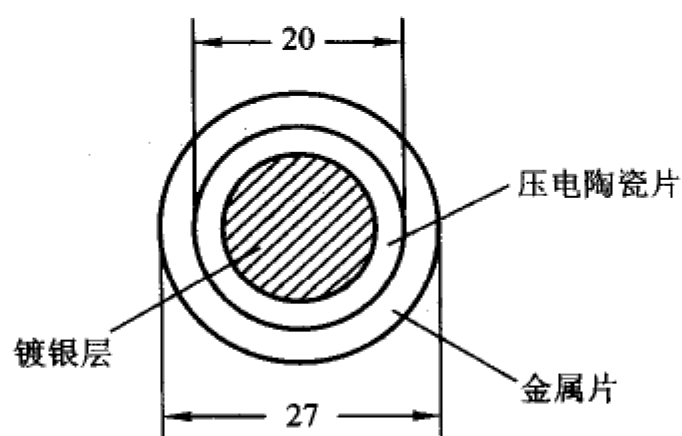
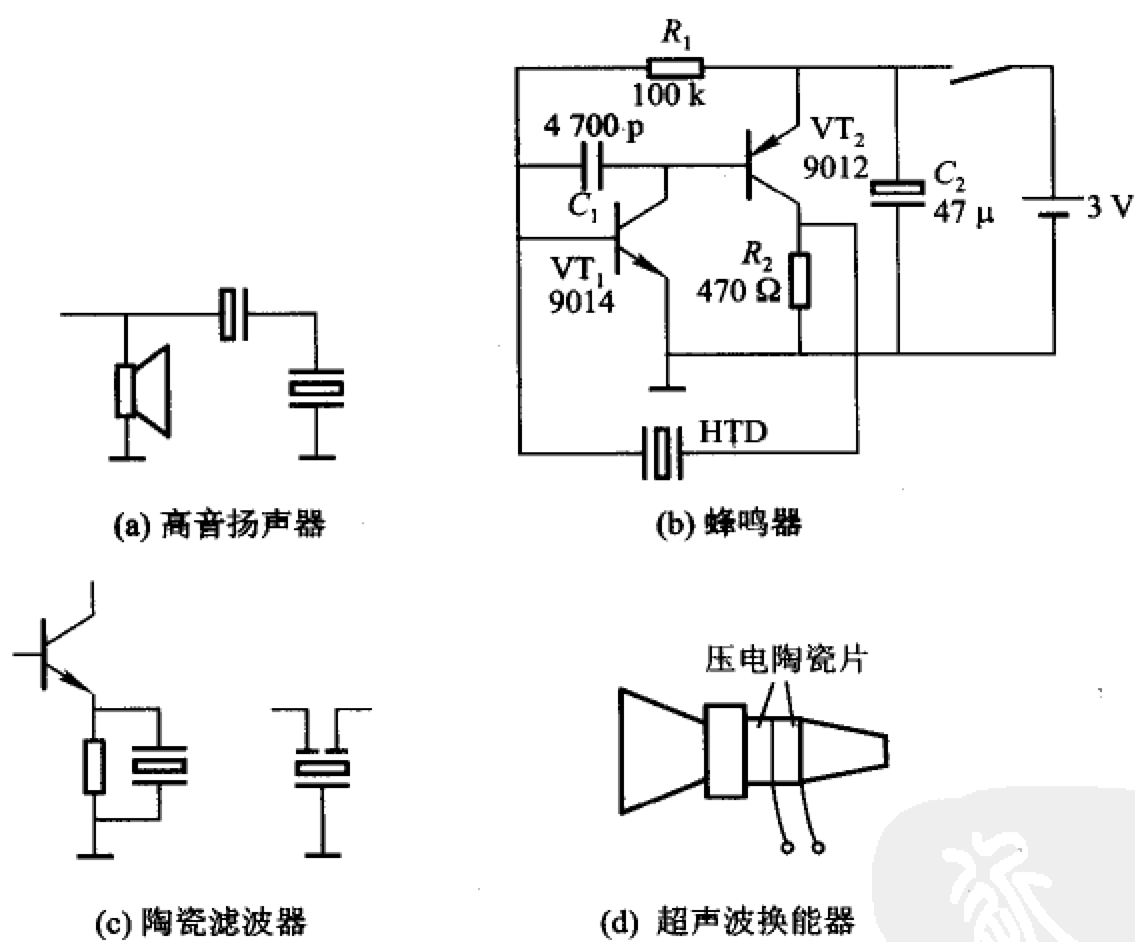


图 A－10－4



(a) 高音扬声器　(b) 蜂鸣器

(c) 陶瓷滤波器　(d) 超声波换能器

图 A－10－5



问题

你能否从物质结构上，对压电性物质有所设想？

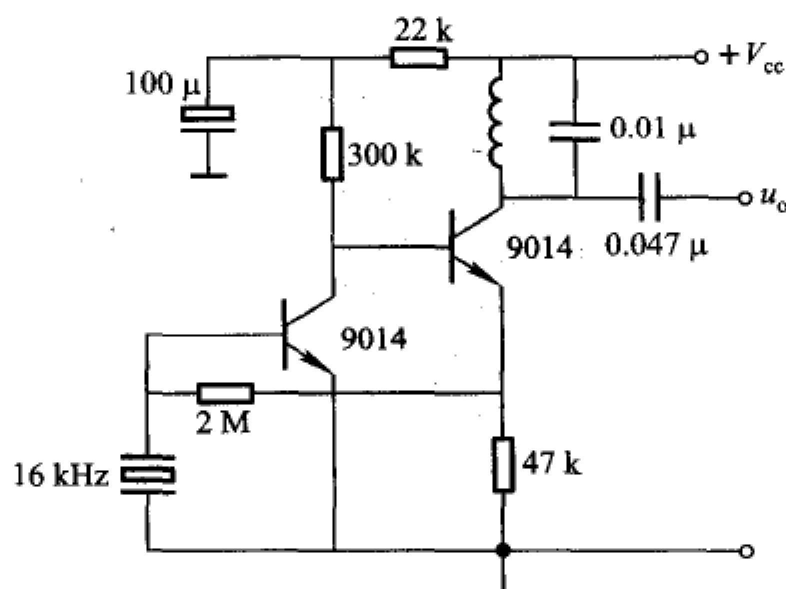


图 A－10－6

参考文献

[1] 马葭生,等.普通物理选题实验 50 例.上海:华东师范大学出版社,1992:204

[2] 杨之昌,马秀芳.物理光学实验.上海:复旦大学出版社,1993:10—11

实验 A－11 隔热玻璃光学特性参量的测试

目的

在投影光学仪器——透射式投影仪和反射式投影仪的设计研制中,为了尽可能提高最后投影画面成像的照度、色彩的保真度及降低投影仪投影物面的工作温度,对组成投影光学仪器的各光学元器件有许多特殊的要求.例如,在投影光学仪器光源前均置放一块特制的隔热玻璃,也常称透明热反射镜,它具有对可见光辐射透射率高和对红外辐射反射率高的光学特性,前者保证投影后的图像色彩不失真,后者把红外辐射反射掉,起到隔热的作用,从而有效地使物面的工作温度不致过高.这种隔热玻璃是用真空镀膜技术在特种耐热玻璃基底上镀上多层光学薄膜制成的.随着真空镀膜工艺的不断发展和完善,目前已能制备满足各种特殊要求的增透膜、反射膜、干涉滤光膜、偏振膜、分光膜,以满足各种精密光学仪器的不同需要.而各种光学薄膜的设计和应用也已发展成为新的物理光

学分支——薄膜光学.而在对光学薄膜的测试应用中,下列两项测试,即光谱的透射特性曲线及光谱的反射特性曲线的测试是经常用到的.本实验仅从使用角度出发,介绍光谱透射特性曲线及反射特性曲线测试的原理和方法.其他如投影光学仪器最后投影画面色彩的保真度还和所用光源光谱能量分布密切相关,因而要进行光源的光谱能量分布测试,有关的测试原理和方法可参考相关的书籍[1].

仪器和用具

WDG－05 型平面光栅单色仪、GDB－44 光电倍增管、晶体管毫伏表、卤钨灯、透镜一块、马达带动的斩波器、光电倍增管用直流高压电源、待测镀膜隔热玻璃、反射率特性曲线已知的标准样品.

原理

当一束光入射到一个物体上时,光在该物体上将产生反射、吸收和透射.根据能量守恒定律,其入射光强 $I_0(\lambda)$ 应等于反射光强 $I_r'(\lambda)$,吸收光强 $I_a'(\lambda)$ 及透射光强 $I_t'(\lambda)$ 之和,即

$$I_0(\lambda)=I_r'(\lambda)+I_a'(\lambda)+I_t'(\lambda) \qquad (A-11-1)$$

将式(A－11－1)两端同除以 $I_0(\lambda)$,并令

$$\frac{I_r'(\lambda)}{I_0(\lambda)}=r(\lambda)\text{——反射率} \qquad (A-11-2)$$

$$\frac{I_a'(\lambda)}{I_0(\lambda)}=a(\lambda)\text{——吸收率} \qquad (A-11-3)$$

$$\frac{I_t'(\lambda)}{I_0(\lambda)}=t(\lambda)\text{——透射率} \qquad (A-11-4)$$

且有

$$r(\lambda)+a(\lambda)+t(\lambda)=1 \qquad (A-11-5)$$

本实验就是根据透射率 $t(\lambda)$ 及反射率 $r(\lambda)$ 的定义来测得样品的透射率和反射率,它们都是 λ 的函数.

图 A－11－1 为利用光栅单色仪测定样品透射率 $t(\lambda)$ 的原理框图.光源采用卤钨灯,其在可见光范围有较平坦的能量分布曲线,卤钨灯安装在带遮光罩的灯具座内,光电倍增管作为探测器,分别接收由光栅单色仪出射狭缝射出的每一不同波长对应的光电流,光电流的大小可用晶体管毫伏表读出(mV 数),入射光束由于采用了马达带动的遮光叶片的斩波,使连续光束成为断续的交变光信号,其目的是增大接收信号的灵敏度.在图 A－11－1 中,设光路中未放置待测的镀

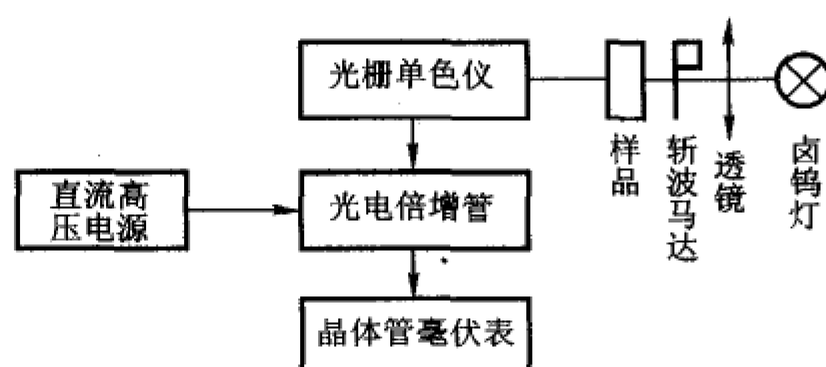


图 A-11-1

有多层膜的隔热玻璃样品时，晶体管毫伏表的电压读数为 $V_0(\lambda)$，该值和卤钨灯的发光能量分布函数$B(\lambda)$、单色仪的透射率$t_0(\lambda)$、光电倍增管的光谱灵敏度$D(\lambda)$、单色仪狭缝宽度所对应的光谱宽度 $d\lambda$ 成正比，即

$$V_0(\lambda) \propto B(\lambda) \cdot t_0(\lambda) \cdot D(\lambda) \cdot d\lambda \qquad (A-11-6)$$

当在光路中插入待测样品时，晶体管毫伏表上的读数设为$V'(\lambda)$，而 $V'(\lambda)$除了与卤钨灯的能量分布 $B(\lambda)$、单色仪的透射率$t_0(\lambda)$，光电倍增管的探测灵敏度$D(\lambda)$、光谱宽度 $d\lambda$ 有关外，还与待测样品的透射率 $t(\lambda)$成正比，即

$$V'(\lambda) \propto B(\lambda) \cdot t_0(\lambda) \cdot D(\lambda) \cdot t(\lambda) \cdot d\lambda \qquad (A-11-7)$$

由于在上述两次测量中，使用相同的光源、单色仪、光电倍增管及相同的狭缝宽度，实验条件均相同，因此，前后两次测量中的$B(\lambda)$，$t_0(\lambda)$，$D(\lambda)$与 $d\lambda$ 都相同. 故将式(A-11-7)除以(A-11-6)得

$$t(\lambda) = V'(\lambda)/V_0(\lambda) \qquad (A-11-8)$$

上式表明，镀有多层介质膜的隔热玻璃样品的透射率可以由光路中加与不加样品时，晶体管毫伏表的电压读数 $V'(\lambda)$及 $V_0(\lambda)$测得. 利用单色仪中平面光栅的转动，可以改变波长，从而测得相应于不同波长的透射率，由此可得透射率曲线.

测定反射率 $r(\lambda)$的光路框图如图 A-11-2 所示，和测定透射率的框图相比较，差别在于入射光部分，经过斩波马达调制的入射光，经过反射镜反射，然后，分别由安装在样品架上的标准样品及待测样品反射后入射到光栅单色仪. 测量中，先把标准样品置于入射光的方向，记下晶体管毫伏表的读数 $V_1(\lambda)$，然后平移样品架，入射光由待测样品反射后进入单色仪，记下读数 $V_0(\lambda)$，由于标准样品的反射率是已知的，设为 $r_1(\lambda)$，则待测样品的反射率为

$$r(\lambda) = \frac{V_0(\lambda)}{V_1(\lambda)} \cdot r_1(\lambda) \qquad (A-11-9)$$

本实验中，用于检测光信号的探测仪器是光电倍增管，光电倍增管的工作原理是光电效应. 管内有一个阴极 K，若干个二次发射极 $D_1, D_2, D_3, \cdots, D_n$ 和一个

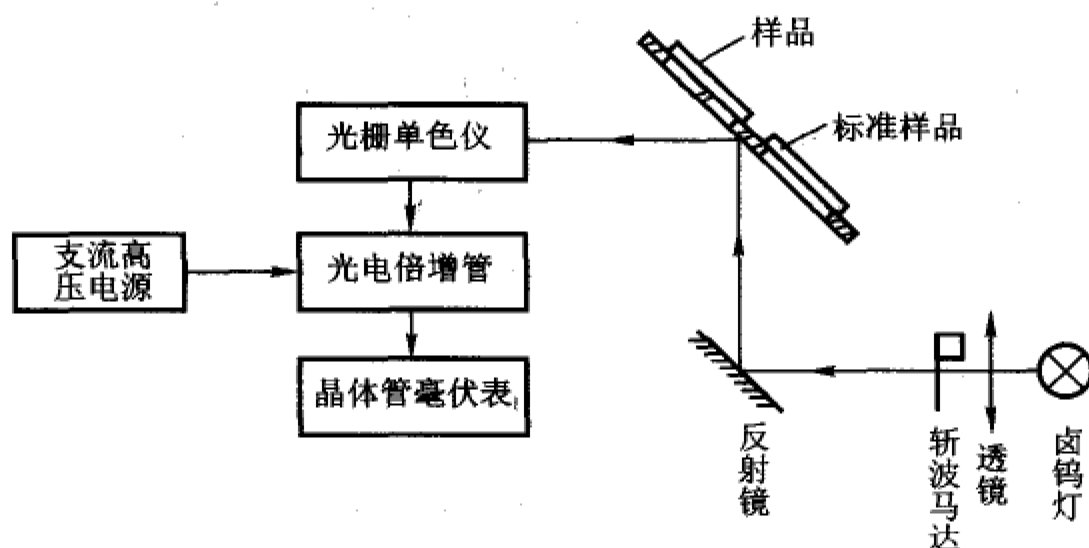


图 A－11－2

阳极 A，如图 A－11－3 所示. 使用时，先要在各电极间加上合适的直流电压，形成极间电场. 当光子入射到光电倍增管的光阴极上时，若光子能量 $h\nu$ 大于光阴极材料的电子逸出功 W，光阴极发射出电子，这一初级电子被极间电场加速而轰击二次发射极 D_1，使 D_1 发射出更多的次级电子，这些电子再被极间电场加速而轰击 D_2，D_2 再发射出更多的次级电子，这样，电子数就逐级递增，最后到达阴极的电子数可达原来的数百万倍. 所以光电倍增管的灵敏度比一般光电器件（光电管、光电池、光电二极管等）都高得多，即便是微弱的光照都能产生较大的阳极电流. 因此，当光电倍增管在加上高压后，要严格避免受强光照射，测量中应控制光电倍增管的电流在 10 μA 以下，以避免损坏光电倍增管. 当光电倍增管加上高压电后，即便处在完全的暗环境下，阳极电流仍不为零，这一电流为暗电流，暗电流的影响应在测量中予以扣除.

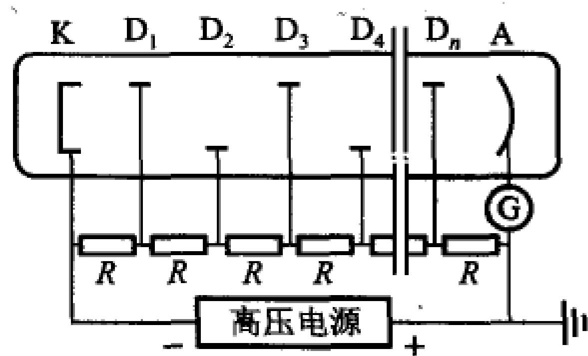


图 A－11－3

为提供各电极间的电压，可使用如图 A－11－3 所示的分压电路，分压值的设置要根据所选用光电倍增管的要求而定，而高压电源输出必须保证很高的稳定度. 例如不稳定度要小于 0.01%.

实验内容

1. 测可见光范围内，镀膜隔热玻璃的透射率曲线，绘出0.4 μm到 0.7 μm可见光范围内的透射率曲线. 如果要测量到红外部分，则上述的分光部分和检测部分要作怎样的调整？试提出方案、并说明理由.

2. 测 0.4 μm 到 1.2 μm 范围内，镀膜隔热玻璃的反射率曲线. 由于一般光电倍增管的光谱灵敏范围在 0.4 μm 到 0.85 μm 的范围内，所以要在 0.4 μm 到 1.2 μm 范围测量，可选用 ΦЭУ－22 及 ΦЭУ－28 型光电倍增管. 其光谱灵敏度范围为 0.40 μm ~ 1.2 μm. 也可改用硅光电池进行测量. 其光谱区域为 0.4 μm ~ 1.1 μm，截止波长为 1.2 μm. 基本满足所测波长范围. 其次要考虑光栅单色仪光谱范围.

3. 设计一测量方案，测量卤钨灯的光谱能量分布.

参考文献

[1] 马葭生，等. 普通物理选题实验 50 例. 上海：华东师范大学出版社，1992:219

[2] 杨之昌. 马秀芳. 物理光学实验. 上海：复旦大学出版社，1993:50

实验 A－12 音频信号光纤传输技术实验

目的

1. 了解音频信号光纤传输系统的结构及选配各主要部件的原则；
2. 熟悉半导体电光/光电器件的基本性能及基本特性的测试方法；
3. 掌握半导体电光/光电器件在模拟信号光纤传输系统中的应用技术；
4. 训练音频信号光纤传输系统的调试技能.

仪器和用具

YOF－C 型音频信号光纤传输技术实验仪、DOP－B 型光功率计、双踪示波器、数字万用表.

原理

1. 系统的组成

图 A－12－1 所示为音频信号直接光强调制光纤传输系统的结构原理图，它主要包括由半导体发光二极管 LED 及其调制、驱动电路组成的光信号发送器，传输光纤和由光电二极管、I/V 转换电路和功放电路组成的光信号接收器三

个部分. 组成该系统时,光源 LED 的发光中心波长必须在传输光纤呈现低损耗的 0.85 μm、1.3 μm 或 1.6 μm 附近,光电检测器件的峰值响应波长也应与此接近. 本实验采用发光中心波长为 0.85 μm 的 GaAs 半导体发光二极管作光源,峰值响应波长为 0.8～0.9 μm 的硅光电二极管(SPD)作光电检测元件.

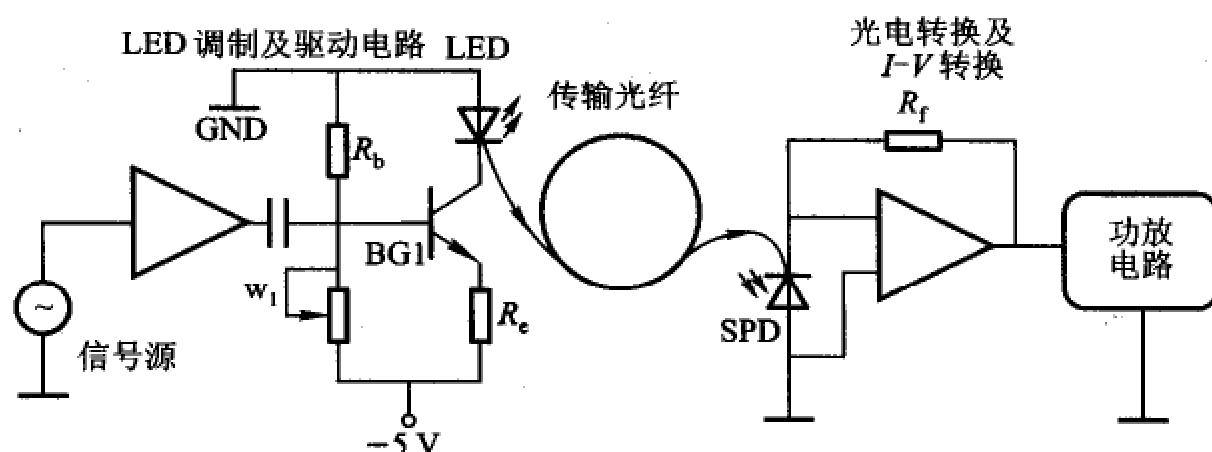


图 A－12－1　音频信号直接光强调制光纤传输系统结构原理图

为了避免或减少谐波失真,要求整个传输系统的频带宽度要能覆盖被传信号的频谱范围;对于语音信号,其频谱在 300～3 400 Hz的范围内. 由于光导纤维对光信号具有很宽的频带,故在音频范围内,整个系统的频带宽度主要决定于发送端调制放大电路和接收端功放电路的幅频特性.

2. 半导体发光二极管结构及工作原理

光纤通信系统中对光源器件在发光波长、电光效率、工作寿命、光谱宽度和调制性能等许多方面均有特殊要求,所以不是随便哪种光源器件都能胜任光纤通信任务. 目前在以上各个方面都能较好满足要求的光源器件主要有半导体发光二极管(LED)和半导体激光器(LD).

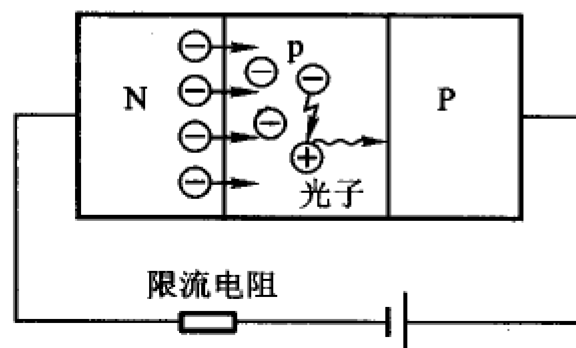


图 A－12－2　半导体发光二极管的结构及工作原理

光纤传输系统中常用的半导体发光二极管是一个如图 A－12－2所示的 N－p－P三层结构的半导体器件,中间层通常是由直接带隙的 GaAs(砷化镓)p 型半导体材料组成,称有源层,其带隙宽度较窄,两侧分别由 GaAlAs 的 N 型和 P

型半导体材料组成，与有源层相比，它们都具有较宽的带隙. 具有不同带隙宽度的两种半导体单晶之间的结构称为异质结，在图 A－12－2 中，有源层与左侧的 N 层之间形成的是 p－N 异质结，而与右侧 P 层之间形成的是 p－P 异质结，故这种结构又称 N－p－P 双异质结构，简称 DH 结构. 当给这种结构加上正向偏压时，就能使 N 层向有源层注入导电电子，这些导电电子一旦进入有源层后，因受到右边 p－P 异质结的阻挡作用不能再进入右侧的 P 层，它们只能被限制在有源层内与空穴复合. 导电电子在有源层与空穴复合的过程中，其中有不少电子要释放出能量满足以下关系的光子：

$$h\nu = E_1 - E_2 = E_g \quad (A-12-1)$$

其中 h 是普朗克常量，ν 是光波的频率，E_1 是有源层内导电电子的能量，E_2 是导电电子与空穴复合后处于价键束缚状态时的能量. 两者的差值 E_g 与 DH 结构中各层材料及其组分的选取等多种因素有关，制作 LED 时只要这些材料的选取和组分的控制适当，就可使得 LED 的发光中心波长与传输光纤的低损耗波长一致. 半导体发光二极管的伏安特性如图 A－12－3 所示，与普通二极管不同，它的导通电压不是在 0～0.7 V 之间，而是在 1 V 以上.

光纤通信系统中使用的半导体发光二极管的光功率是经称为尾纤的光导纤维输出的，出纤光功率与 LED 驱动电流的关系称为 LED 的电光特性，如图 A－12－4所示. 为了避免和减少非线性失真，使用时应先给 LED 一个适当的偏置电流 I，其值等于这一特性曲线线性部分中点对应的电流值，而调制信号的峰－峰值应位于电光特性的直线范围内. 对于非线性失真要求不高的情况下，也可把偏置电流选为 LED 最大允许工作电流的一半，这样可使 LED 获得无截止畸变幅度最大的调制，这有利于信号的远距离传输.

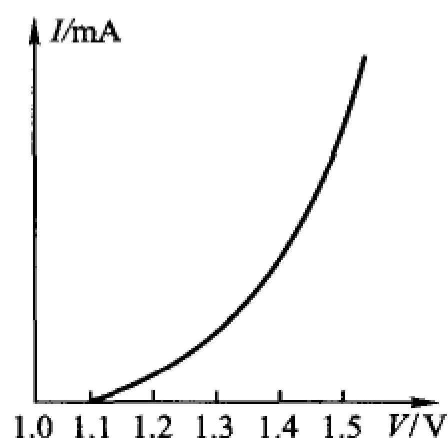


图 A－12－3 LED 的伏安特性

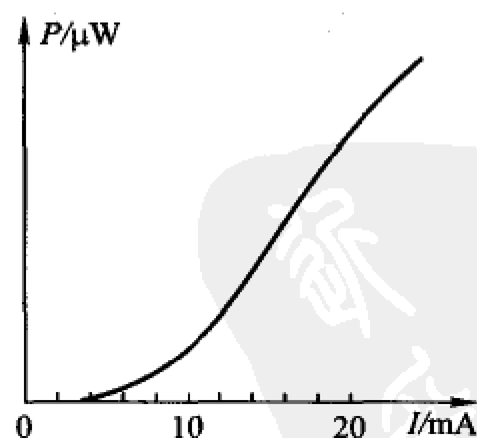


图 A－12－4 LED 的电光特性

3. LED 的驱动及调制电路

音频信号光纤传输系统发送端 LED 的驱动和调制电路如图 A－12－5 所示，以 BG1 为主构成的电路是 LED 的驱动电路，调节这一电路中的 w_2 可使 LED

的偏置电流在 0～50 mA 的范围内变化．被传音频信号由以 IC1 为主构成的音频放大电路放大后经电容器 C_4 耦合到 BG1 的基极，对 LED 的工作电流进行调制，从而使 LED 发送出光强随音频信号变化的光信号，并经光导纤维把这一信号传至接收端．

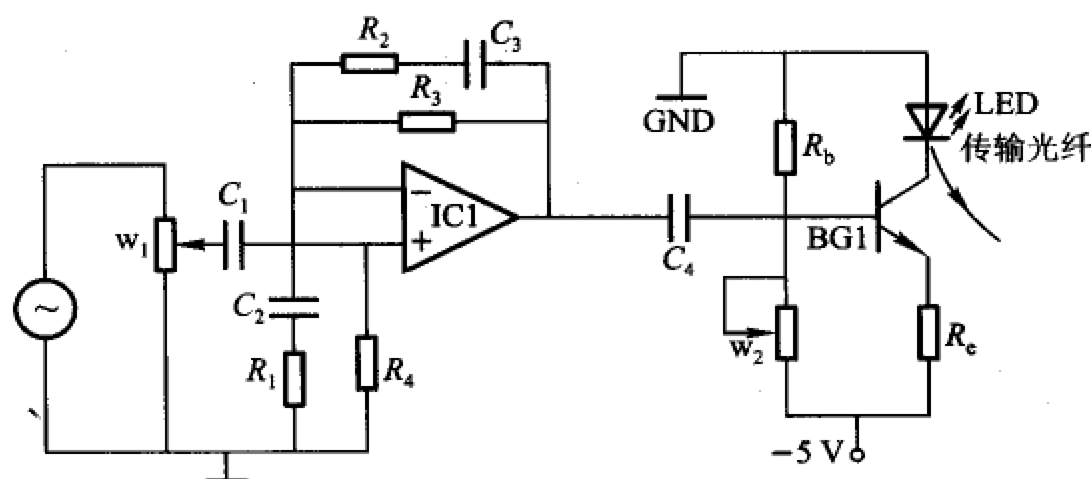


图 A－12－5　LED 的驱动和调制电路

根据运放电路理论，图 A－12－5 中音频放大电路的闭环增益为

$$G(j\omega)=1+Z_2/Z_1 \qquad (A-12-2)$$

其中 Z_2、Z_1 分别为放大器反馈阻抗和反相输入端的接地阻抗，只要 C_3 选得足够小，C_2 选得足够大，则在要求带宽的中频范围内，C_3 的阻抗很大，它所在支路可视为开路，而 C_2 的阻抗很小，它可视为短路．在此情况下，放大电路的闭环增益 $G(j\omega)=1+R_3/R_1$．C_3 的大小决定了高频端的截止频率 f_2，而 C_2 的值决定着低频端的截止频率 f_1．故该电路中的 R_1、R_2、R_3、C_2 和 C_3 是决定音频放大电路增益和带宽的几个重要参数．

4．光信号接收器

图 A－12－6 是光信号接收器的电路原理图，其中 SPD 是峰值响应波长与发送端 LED 光源发光中心波长很接近的硅光电二极管，它的峰值波长响应度为 0.25～0.5 μA/μW（有关它的结构、工作原理及性能等问题，见本书实验 A－8 半导体光电二极管伏安特性的测定）．SPD 的任务是把传输光纤出射端输出的光功率转变为与之成正比的光电流 I_o，然后经 IC1 组成的 I/V 转换电路，再把光电流转换成电压 V_o 输出，V_o 与 I_o 之间具有以下比例关系：

$$V_o=R_fI_o \qquad (A-12-3)$$

以 IC2 为主构成的是一个音频功放电路，只要调节外接的电位器 w_{nf}，可改变功放电路的电压增益．

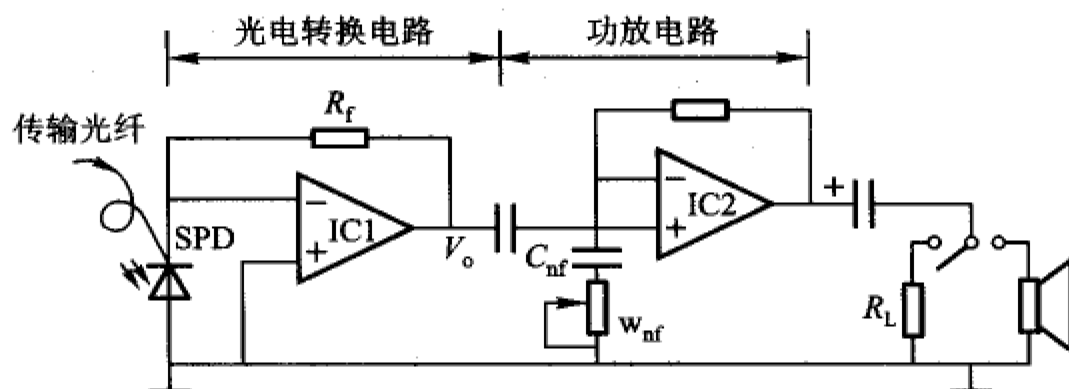


图 A－12－6　光信号接收器的电路原理图

实验内容

1. 半导体发光二极管(LED)伏安特性的测定

测试电路如图 A－12－7 所示，测量时调节电位器 w_2 使电压表 V 的读数从 1.2 V 开始逐渐增加，每增加 30 mV 时，读取一次毫安表 mA 的示值，直到电压表读数为 1.56 V 时止，根据测量结果描绘 LED 伏安特性曲线.

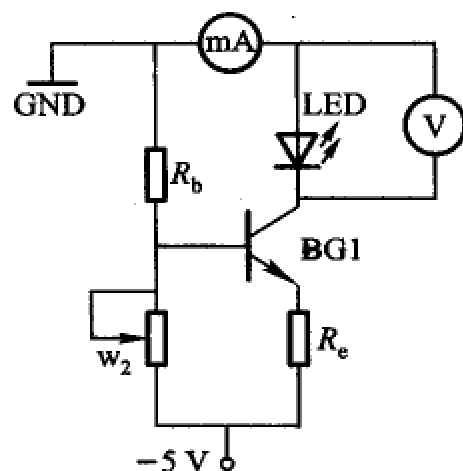


图 A－12－7　LED 伏安特性的测定

2. LED－传输光纤组件电光特性的测定

测试电路如图 A－12－8 所示，测量时，首先调节 w_2 使毫安表指示从零逐渐增加，每增加 5 mA 读取一次光功率示值，直到 50 mA为止. 根据测量结果描绘 LED 传输光纤组件的电光特性曲线，并确定出其线性度较好的线段.

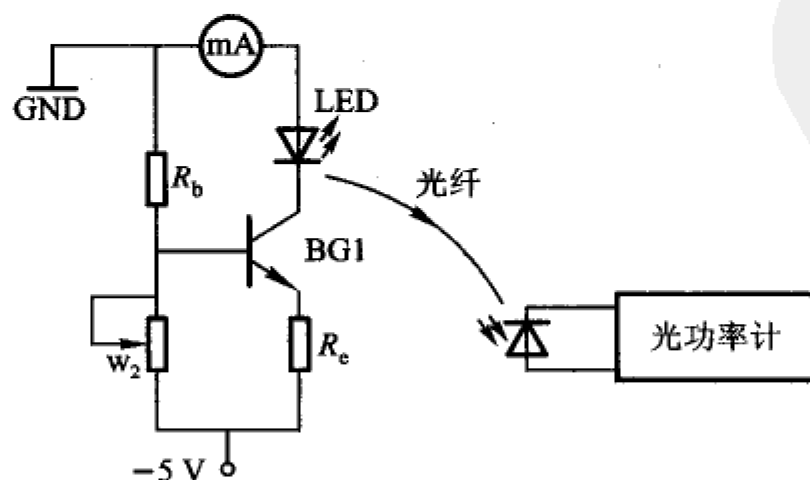


图 A－12－8　LED 传输光纤组件电光特性的测定

3. 硅光电二极管光电特性及响应度的测定

测量电路如图 A-12-9 所示,测量时,首先把 SPD 切换开关 S 倒向 A 侧,在 LED 小于 50 mA 的任一驱动电流下,进行 LED 尾纤与 SPD 光敏面最佳光耦合状态的调节后,调节 w_1 电位器使 LED 的偏置电流为 50 mA,记下光功率计的读数,若用 ΔP 表示对此读数取整后的数值. 此后继续调节 w_1 使 LED 光纤组件输出的光功率从零逐渐增加,每增加一个 ΔP 值把开关 S 从 A 掷向 B 一次,并读取和记录一次由 IC1 组成的 $I-V$ 变换电路的输出电压 V_o 的示值,根据测量结果和 R_f 的值(10 kΩ),描绘 SPD 的光电特性,并计算它在 LED 发光波长处的响应度 R 的值.

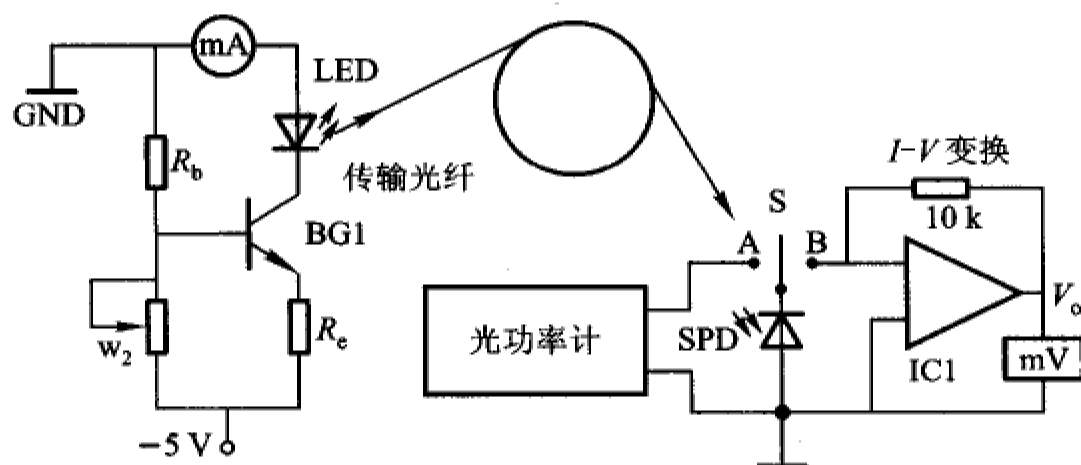


图 A-12-9 硅光电二极管光电特性的测定

4. LED 最佳工作点的确定及系统发送的最大光信号的测定

在未加调制信号时,LED 的偏置电流的大小对于音频信号光纤传输系统的传输性能影响很大. 图 A-12-10 表明了 LED 在两种不同偏置状态下,同样幅度 ΔV 的输入电信号最后转换成的光信号幅度差异十分明显. 所谓 LED 最佳工作点选择,就是在 LED 所确定的偏流状态下,在其伏安特性和电光特性曲线上从电压信号转换成电流信号、再从电流信号转变成光信号的转换系数要尽可能大(即处于这些特性曲线斜率最大的区域内),另一方面在所选定的工作点上,还要使传输系统无非性失真的调制信号的幅度要尽可能大. 这样才能使传输系统发送端发送出的无非线性失真的光信号最强,这有利于信号的远距离传输. 当然,选定的 LED 的工作电流也必须在其允许的最大工作电流范围内.

根据对 LED 伏安特性和电光特性的所测得的实验数据,按以上原则确定一个 LED 的最佳工作点,然后按图 A-12-1 接线,组成一个音频信号光纤传输系统,并把 LED 的偏流调至所选的工作点对应的电流值. 在此之后,从零开始逐渐增加正弦调制信号幅度,直到指示接收端 $I-V$ 变换电路输出电压的电压表读数有偏离原有的预定值时为止,用示波器观测 $I-V$ 变换电路输出波形的

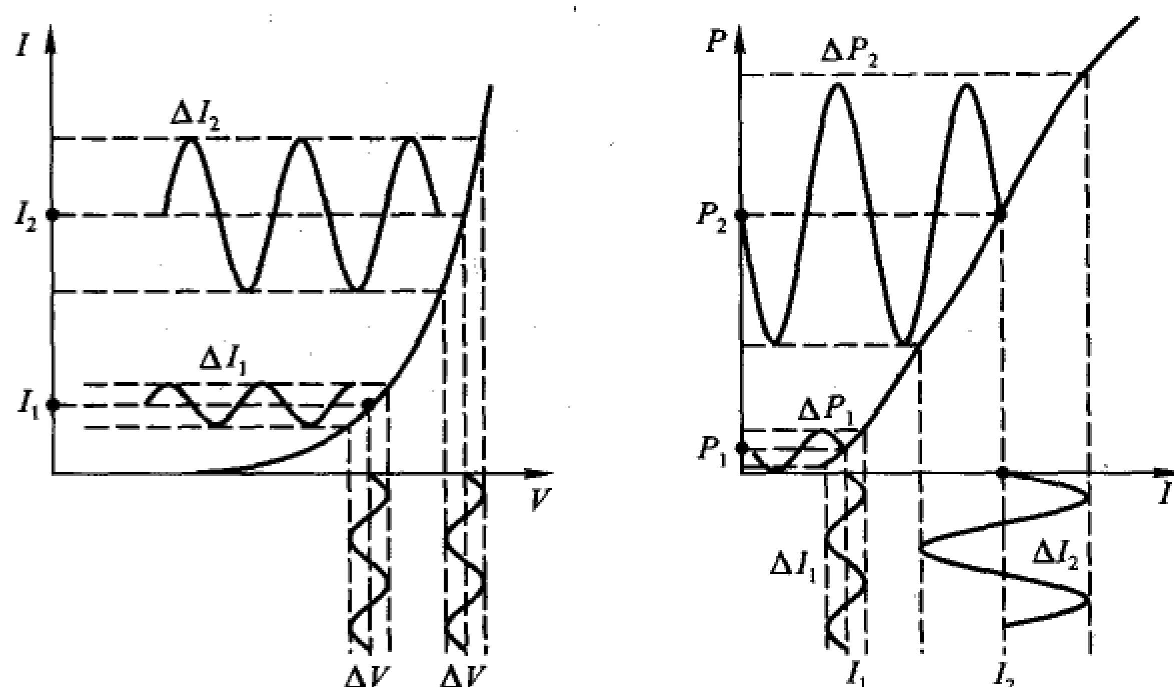


图 A－12－10 LED 工作点的正确选择

峰－峰值.

根据 SPD 的光电特性、R_f 阻值及 $I-V$ 变换电路输出波形的峰－峰值计算本实验系统传输光纤输出的最大光信号光功率的峰－峰值.

5. 接收器允许的最小光信号幅值的估测

把调制信号源频率选为 1 kHz,在保持实验系统以上连接不变情况下,逐渐减小 LED 的偏置电流,并适当减小调制信号源的幅度,使接收器 $I-V$ 变换输出电压交流分量的波形为无截止畸变的最大幅值,此后继续减小 LED 的偏流和调制信号的幅度. 随着 LED 偏置电流的减小,用示波器观察到的以上交流信号最大幅值也愈来愈小,当 LED 的偏流小到某一值时,这一交流信号的幅值就可能与系统存在的噪声信号的幅值可比较,对应于这一状态的光信号的幅值就是本实验系统接收器允许的最小光信号的幅值. 知道系统接收端允许的最小光信号的幅值和 LED 传输光纤组件输出的最大光信号幅值后,就可根据光纤损耗计算出本实验系统的最大传输距离.

6. 语音信号的传输

把发送器的输入端接入收音信号,接收器功放输出端接上4 Ω的扬声器,试验整个音频信号光纤传输系统的音响效果. 试验时,可适当调节发送器的 LED 偏置电流、输入信号幅度或接收器功放电路中的电位器 w_{nf} 的阻值,考察传输系统的听觉效果并用示波器监测系统的输入和输出信号的波形变化.

思考题

1. 在 LED 已确定的情形下，为了实现光信号的远距离传输，应如何设定它的偏置电流和调制幅度？

2. 当调制信号幅度较小时，指示 LED 偏置电流的毫安表读数与调制信号幅度无关，当调制信号幅度增加到某一程度后，毫安表读数将随调制信号的幅度增加，为什么？

3. 利用 SPD、$I-V$ 变换电路和数字毫伏表设计一个光功率计.

参考文献

[1]　赵保金，等. 音响集成电路及其应用. 北京：人民邮电出版社，1987

实验 A－13　自聚焦透镜及其光学参量的实验测量

目的

1. 了解分析光线在非均匀介质中传播规律的理论基础；
2. 认识一种新型光学元件——自聚焦透镜的聚焦和成像性质；
3. 掌握利用成像法测量自聚焦透镜光学参量的基本原理及实验技术；
4. 观察自聚焦透镜在激光束光纤传输系统中的再准直效果.

仪器和用具

自聚焦透镜（四分之一周期长度）、缩微透明图片一张、白光照明光源及滤光片、传像光纤束、五维调节架、读数显微镜底座、显微镜、光具座、He－Ne 激光器、光导纤维.

原理

自聚焦透镜是一种形状为圆柱体的新型光学元件（图 A－13－1），其平行于轴线方向的折射率 $n(\rho)$ 按以下方式分布：

$$n(\rho)=n(0)[1-\gamma^2\rho^2/2],\ 0<\rho\leqslant R \qquad (A-13-1)$$

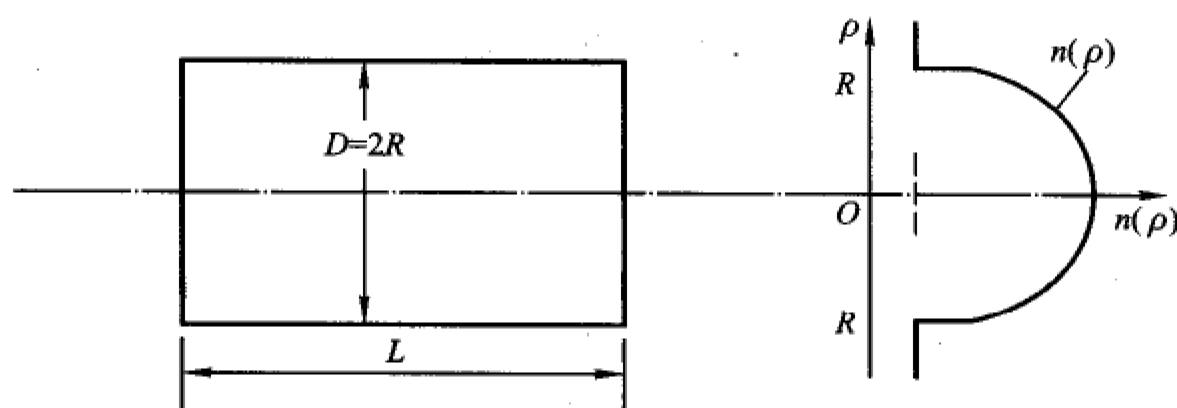


图 A-13-1　自聚焦透镜的结构

$n(0)$为轴线上的折射率，ρ为到轴线的距离，R为圆柱半径，γ^2为聚焦常数. 根据非均匀介质中射线光学理论的分析可知，这种光学元件与普通透镜一样具有聚焦和成像性质. 但与普通透镜相比，它的焦距容易做得很短；作成像元件时，它具有小的共轭距离. 因此它已广泛地应用于需要激光束聚焦的光盘技术和需要尺寸紧凑的成像系统中.

自聚焦透镜的聚焦特性和成像性质与它的几何参量（透镜的长度 L）和光学参量（$n(0)$、γ^2）有密切关系. 所以实验上测量这些参量对于了解自聚焦透镜的聚焦和成像性能都具有十分重要的意义. 测量这些参量的方法较多，其中有端面反射法、切片干涉法和横向干涉法[1]等，但这些方法需要的测试设备价格昂贵，测量手续较为复杂. 本实验采用的成像法原理简单，操作方便. 现对自聚焦透镜的聚焦及成像性质和光学参量的测量方法论述如下.

1. 聚焦和成像性质的分析

(1) 基本方程

现从射线光学角度对自聚焦透镜的聚焦和成像性质加以分析. 图 A-13-2 画出了一条在自聚焦透镜中传播的子午光线，它的轨迹应遵从以下普遍形式的射线方程[2]：

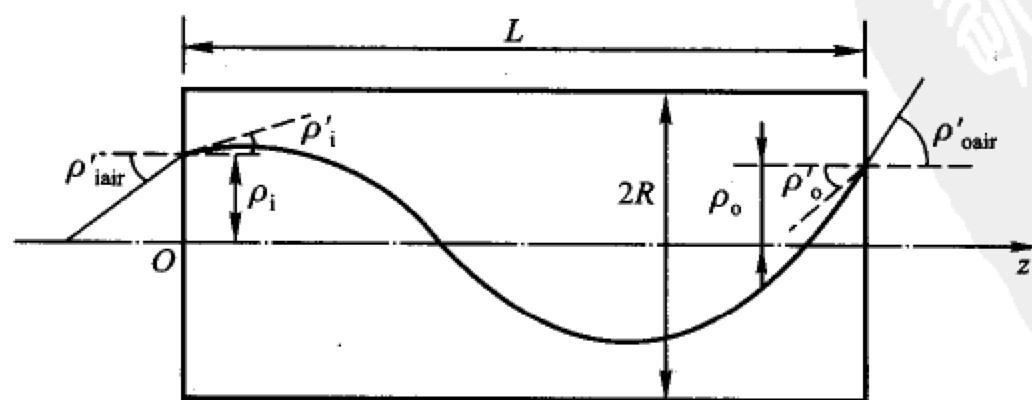


图 A-13-2　自聚焦透镜中的子午光线

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}s}\left[n(\boldsymbol{r})\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{r}}{\mathrm{d}s}\right]=\mathrm{grad}[n(\boldsymbol{r})] \tag{A-13-2}$$

式(A－13－2)中的 s 是从某一起始参考点沿射线轨迹到所论点的距离，$\boldsymbol{r}$ 是该点的位置矢量. 对于子午光线，在傍轴近似下，式(A－13－2)可以蜕变为

$$\mathrm{d}^2\rho/\mathrm{d}z^2+\gamma^2\rho=0, \tag{A-13-3}$$

假设在 $z=0$ 处，子午光线的径向距离和斜率分别为 ρ_i 和 ρ_i'，利用这一初始条件，方程(A－13－3)的解为

$$\left.\begin{aligned}\rho(z)&=\cos(\gamma z)\rho_i+(1/\gamma)\sin(\gamma z)\rho_i'\\ \rho'(z)&=-\gamma\sin(\gamma z)\rho_i+\cos(\gamma z)\rho_i'\end{aligned}\right\} \tag{A-13-4}$$

由方程(A－13－4)可看出，在自聚焦透镜中，子午光线的轨迹具有正弦曲线的形式，其空间周期长度为 $L_T=2\pi/\gamma$. 此外，根据折射定律，对于处在空气介质中的自聚焦透镜，傍轴子午光线在入射端面两侧和出射端面两侧的斜率具有如下近似关系：

$$\left.\begin{aligned}\rho_{\mathrm{iair}}'&=n(0)\rho_i'\\ \rho_{\mathrm{oair}}'&=n(0)\rho_o'\end{aligned}\right\} \tag{A-13-5}$$

所以对于长度为 L 的自聚焦透镜，子午光线在出射端面空气一侧的径向坐标 ρ_o 和斜率 ρ_{oair}' 与入射端面空气一侧处的径向坐标 ρ_i 和斜率 ρ_{iair}' 之间具有如下矩阵关系：

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix}\rho_o\\ \rho_{\mathrm{oair}}'\end{bmatrix}&=\begin{bmatrix}\cos(\gamma L) & [n(0)\cdot\gamma]^{-1}\cdot\sin(\gamma L)\\ -n(0)\cdot\gamma\cdot\sin(\gamma L) & \cos(\gamma L)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\rho_i\\ \rho_{\mathrm{iair}}'\end{bmatrix}\\ &=\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\rho_i\\ \rho_{\mathrm{iair}}'\end{bmatrix}\end{aligned} \tag{A-13-6}$$

其中 $AD-BC=1$.

(2) 聚焦性质的分析

为了说明自聚焦透镜的聚焦性质，现考察一条平行于光轴的入射光线在透镜内和从透镜射出后的行为(图 A－13－3). 这条光线在刚进入透镜时，仍保持其斜率为零. 由于透镜内部是非均匀介质区域，所以这条入射光线进入透镜内部后就要发生弯曲，并按方程(A－13－4)的正弦曲线形式在其中传播. 达到出射端面时，径向坐标为 ρ_o，射离出射端面后又沿斜率为 ρ_{oair}' 的方向直线传播，与光轴交于距出射端面距离为 s_o 的 F 点. 根据图 A－13－3 所示的几何关系和式(A－13－6)可知

$$\rho_o=\rho_i\cos(\gamma L),\quad \rho_{\mathrm{oair}}'=-n(0)\cdot\gamma\cdot\rho_i\cdot\sin(\gamma L)$$

和 $$\rho_o/s_o=\rho_{\mathrm{oair}}'=-n(0)\gamma\rho_i\sin(\gamma L)$$

故 $$s_o=-\cos(\gamma L)/n(0)\cdot\gamma\cdot\sin(\gamma L) \tag{A-13-7}$$

以上结果表明：s_o 的值与平行于透镜轴线的入射光线的离轴距离 ρ_i 值无关，即

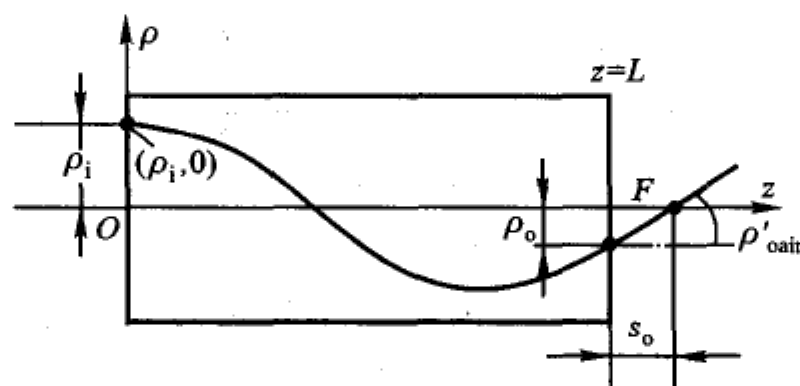


图 A－13－3 自聚焦透镜聚焦性质的分析

在傍轴近似下，所有平行于透镜轴线的入射光线，从透镜出射端面射出后都会交于光轴上同一点 F，故 F 为自聚焦透镜的焦点. 同理可证：若从自聚焦透镜左侧离入射端面距离为 s_o 的光轴上的 F'点发出的光线，经自聚焦透镜后，就会变成一束与光轴平行的平行光束.

对自聚焦透镜也可类似于普通的球面透镜那样定义两个主平面. 在图 A－13－4 中，令经 F'的某一光射线在透镜入射端面上的入射点至第一主平面的距离为 h_{ob}；第一主焦点 F'至入射端面的距离为 s_{ob}，根据主平面的定义画出的图 A－13－4 所示的几何关系和式(A－13－7)，不难得出

$$s_{ob}=-\frac{\rho_i}{\rho'_{iair}}\bigg|_{\rho'_o=0}=\frac{\cos(\gamma L)}{n(0)\cdot\gamma\cdot\sin(\gamma L)} \qquad (A-13-8)$$

$$h_{ob}=\frac{\rho_o-\rho_i}{\rho'_i}\bigg|_{\rho'_o=0}=\frac{\tan(\gamma L/2)}{n(0)\cdot\gamma} \qquad (A-13-9)$$

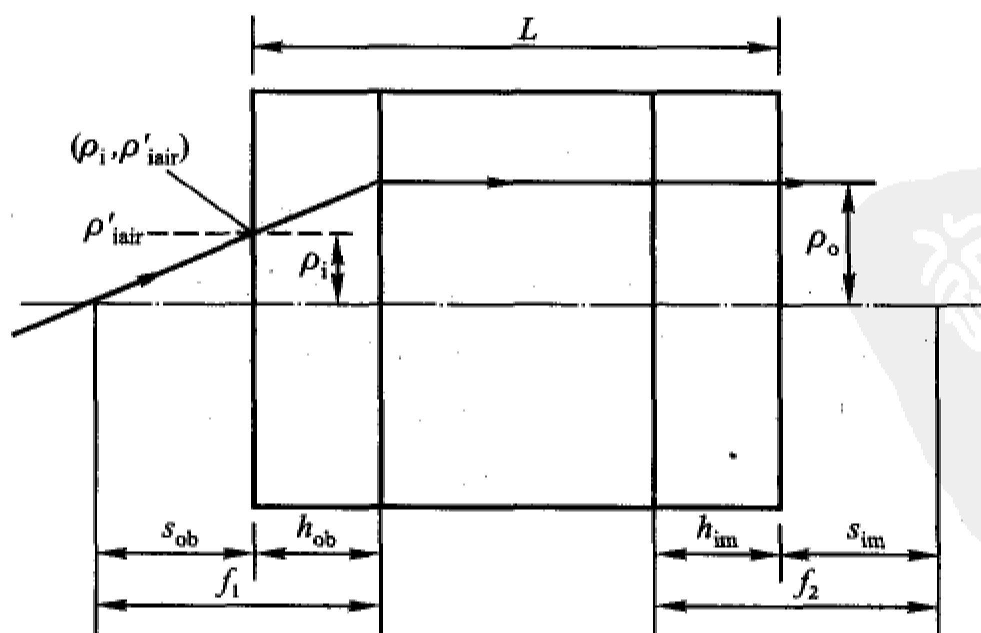


图 A－13－4 自聚焦透镜主平面的确定

式(A－13－8)中的负号是因为第一主焦点逆着光线的传播方向处于入射端面的左侧．所以按定义，自聚焦透镜的第一主焦距

$$f_1 = s_{ob} + h_{ob} = 1/[n(0)\gamma \cdot \sin(\gamma L)] \qquad (A-13-10)$$

对于处于空气介质中的自聚焦透镜，它的第二焦距 f_2 与 f_1 具有同一数值，两者均用符号 f 表示．由上讨论可知：当自聚焦透镜的折射率分布确定之后，焦距 f 与透镜长度 L 具有密切关系，这是自聚焦透镜的一个重要特性．图 A－13－5 示出了其焦距 f 随长度 L 变化的曲线．长度 L 为四分之一空间周期长度 L_T 的奇数倍时，f 具有最小值，即为 $1/\gamma\, n(0)$．适当调整自聚焦透镜折射率径向分布梯度，可使这一最短焦距做得很小，可达 1 mm 以下．要制作焦距这样短的普通透镜，工艺上的难度就较大，然而把自聚焦棒切成具有四分之一周期长度的圆柱体则很容易．

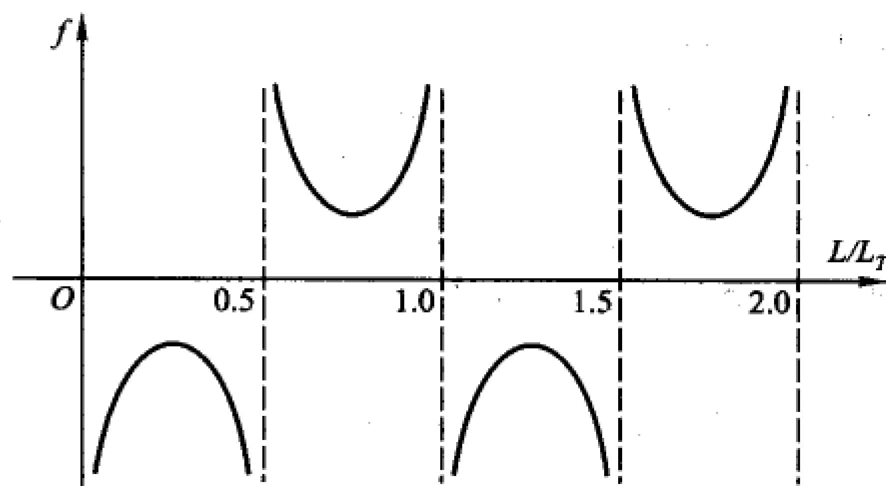


图 A－13－5　自聚焦透镜焦距随长度的变化

(3) 成像关系的推导

为了研究自聚焦透镜的成像性质(参看图 A－13－6)，在透镜左侧(物方)的所有量均用带脚标 ob 的符号表示，右侧(像方)的量用带脚标 im 的符号表示．由式(A－13－6)所表示的 *ABCD* 矩阵关系，该图中所画的光射线的状态参数(径向坐标和斜率)在物点和像点处的变换关系可以写成以下形式：

$$\begin{bmatrix}\rho_{im}\\ \rho'_{im}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & l_{im}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos(\gamma L) & \sin(\gamma L)/n(0)\gamma\\ -n(0)\gamma\cdot\sin(\gamma L) & \cos(\gamma L)\end{bmatrix}\times$$

$$\begin{bmatrix}1 & l_{ob}\\ 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\rho_{ob}\\ \rho'_{ob}\end{bmatrix} \qquad (A-13-11)$$

故

$$\rho_{im} = [\cos(\gamma L) - l_{im}\cdot n(0)\gamma\cdot\sin(\gamma L)]\rho_{ob} + \{l_{ob}\cdot\cos(\gamma L) - l_{ob}\cdot l_{im}\cdot n(0)\gamma\cdot\sin(\gamma L) + \sin(\gamma L)/(n(0)\gamma) + l_{im}\cos(\gamma L)\}\rho'_{ob} \qquad (A-13-12)$$

上式中的 l_{ob} 和 l_{im} 分别为物距和像距，它们的含义如图 A－13－6 所示．由式

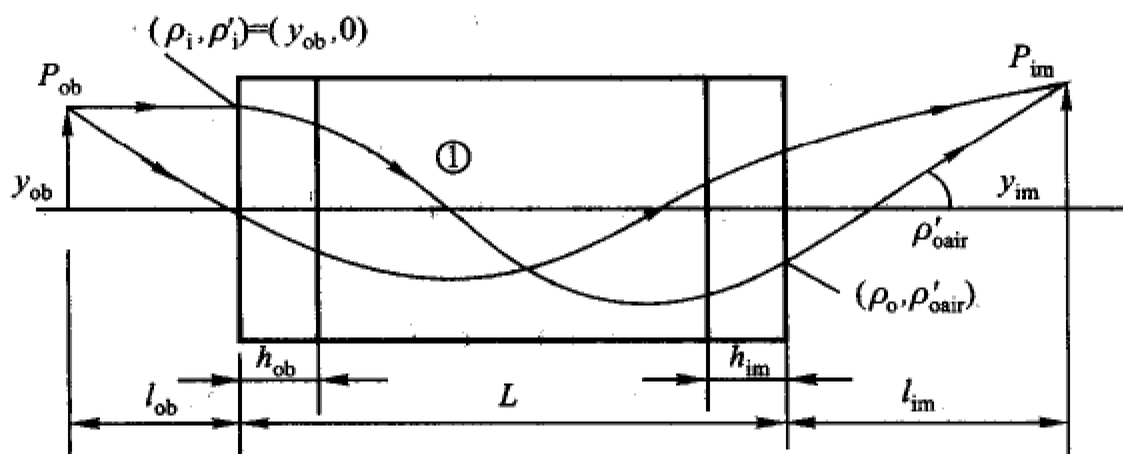


图 A－13－6　自聚焦透镜的成像原理

(A－13－12)可知，只要 l_{ob} 和 l_{im} 的值使得该式等号右边的第二项中 ρ'_{ob} 的系数为零，即物距 l_{ob} 和像距 l_{im} 之间满足以下关系时：

$$l_{im}=\frac{1}{n(0)\gamma}\left\{\frac{\sin(\gamma L)+n(0)\cdot\gamma\cdot l_{ob}\cos(\gamma L)}{n(0)\cdot\gamma l_{ob}\sin(\gamma L)-\cos(\gamma L)}\right\} \tag{A－13－13}$$

则由物点 P_{ob} 发出的所有傍轴光线，无论其斜率如何，均应会聚在像点 P_{im} 上，故式(A－13－13)就是自聚焦透镜的成像关系式. 当透镜长度 $L=L_T/4$，即 $L=\pi/2\gamma$ 时，则

$$l_{im}\cdot l_{ob}=[1/n(0)\cdot\gamma]^2=f_{min}^2 \tag{A－13－14}$$

因 f_{min}^2 的值可以做得很小，所以把具有四分之一周期长度的自聚焦透镜作为成像元件使用时，可以获得很短的共轭距离，这是自聚焦透镜的另一重要特点.

为了获得有关放大倍数 M(像高 y_{im} 对物高 y_{ob} 的比值)的表达式，可考虑由物点 P_{ob} 所发出的光线①的传播情形. 由图 A－13－6的几何关系知

$$y_{im}=l_{im}\rho'_{oair}+\rho_o,\quad y_{ob}=\rho_i$$

又

$$\begin{bmatrix}\rho_o\\ \rho'_{oair}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & B\\ C & D\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\rho_i\\ 0\end{bmatrix}$$

此处 $ABCD$ 矩阵的具体形式如式(A－13－6)所示. 所以放大倍数

$$\begin{aligned}M&\equiv y_{im}/y_{ob}=(l_{im}\rho'_{oair}+\rho_o)/\rho_i\\&=-l_{im}\cdot n(0)\gamma\cdot\sin(\gamma L)+\cos(\gamma L)\end{aligned} \tag{A－13－15}$$

随着自聚焦透镜长度 L 值的改变，M 值可正，可负. 若 $M>0$，为正像；$M<0$ 时，为倒像. 与普通透镜相比，能获得正的实像是自聚焦透镜的又一特点.

2. 成像法测量光学参量的原理

当自聚焦透镜的长度等于四分之一空间周期长度，即 $L=L_T/4=\pi/2\gamma$ 时，因 $\sin(\gamma L)=1$，$\cos(\gamma L)=0$，在此情况下，表示焦距、成像关系和放大倍数的公式具有以下简单形式：

$$\left.\begin{aligned} f &= f_{\min} = \frac{1}{\gamma \cdot n(0)} \\ l_{ob} \cdot l_{im} &= f^2 \\ M &= -l_{im} n(0) \cdot \gamma \end{aligned}\right\} \tag{A－13－16}$$

成像法测量四分之一周期长度的自聚焦透镜的光学参量的原理就是对某一确定高度的物，在某一像距 l_{im} 下测出放大倍数 M 后利用式（A－13－16）算出 $n(0) \cdot \gamma$ 和 f 值，再根据 $L=\pi/2\gamma$ 关系，由透镜长度 L 值便可进一步算出光学参数 γ 和 $n(0)$ 的值.

实验内容

1. 用成像法测量四分之一周期长度的自聚焦透镜的光学参量

具体的测量装置如图 A－13－7 所示. 在该图中，用一个缩微透明图片中的图形作为物，为了减少色散对成像清晰度的影响，物的照明光尽量接近单色. 由于自聚焦透镜的共轭距离很短，为了对像的观察方便，实验系统中采用传像光纤束（也可采用其他方法，如 CCD 面阵光电器件）的一端面接受图像，传像光纤束的另一端用显微镜观察. 为了便于利用直线拟合方法处理实验数据，应在多种像距 l_{im} 情况下，进行多次观测. 实验步骤自拟.

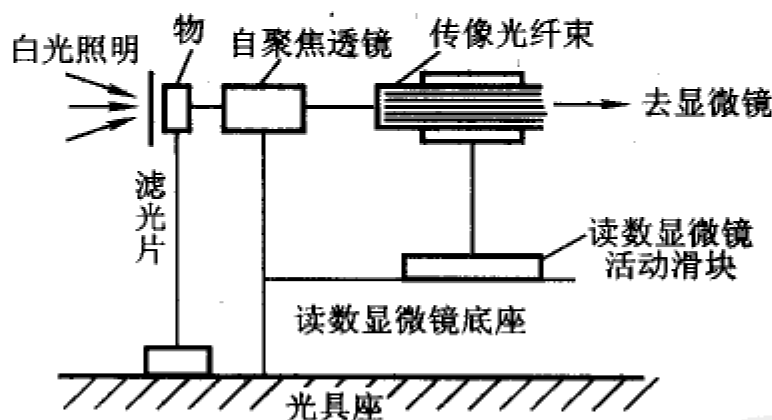


图 A－13－7　成像法测自聚焦透镜光学参量的实验装置

2. 自聚焦透镜在激光束光纤传输技术中的应用

激光束具有单色性和方向性好的优点，但不能沿任意曲线传播到某些需要激光能量的地方，利用光纤传输激光能量虽然能够解决这一问题，但从光纤射出的激光束已不再具有其原有的方向性好的优点，而是一个发散角由光纤数值孔径决定的发散光束[2]. 若在传输光纤出射端面加一个四分之一周期长度的自聚焦透镜，可以使从光纤端面射出的激光束再次准直. 这样的光学系统，既能在较大的程度上保持激光束原有的方向性好的优点，又能使激光束的能量到达通常

不易到达的地方.

利用实验室提供的 He - Ne 激光器和光导纤维. 按上述结构,自组一个自聚焦透镜在激光束光纤传输系统中再准直应用的实验系统,并利用该系统观察激光束的再准直效果.

参考文献

[1] (美)马库塞 D. 光纤测量原理. 杜柏林,等译. 北京:人民邮电出版社,1986

[2] 朱世国,傅克祥. 纤维光学:原理及实验研究. 成都:四川大学出版社,1992

实验 A - 14 数字式光信号检测和再生电路的理论分析及实验研究

目的

1. 了解用计算机控制的数字信号光纤传输技术的基本原理;
2. 学习数字信号光电转换及再生电路的理论分析方法;
3. 掌握数字信号光电转换及再生电路的实验研究方法.

仪器和用具

DOF - D 型数字信号光纤传输技术实验仪、DOP - B 型光功率计、计算机、20M 双踪示波器、数字万用表.

原理

光纤传输技术是现代科学技术发展的一项新成就,光纤通信是这项技术应用的重要领域,随着科学技术的发展,这一技术的应用范围会越来越广.

图 A - 14 - 1 所示的是一种由微型计算机控制的数字信号的光纤传输系统,在该系统上,既可通过各种传感器传输包括语音信号在内的各种物理量,也可传输文字和图表等信息的数字信号. 该系统在硬件上由以下几个部分组成:① 光信号的调制和发送部分;② 传输光纤;③ 光信号的检测和再生部分;④ 计

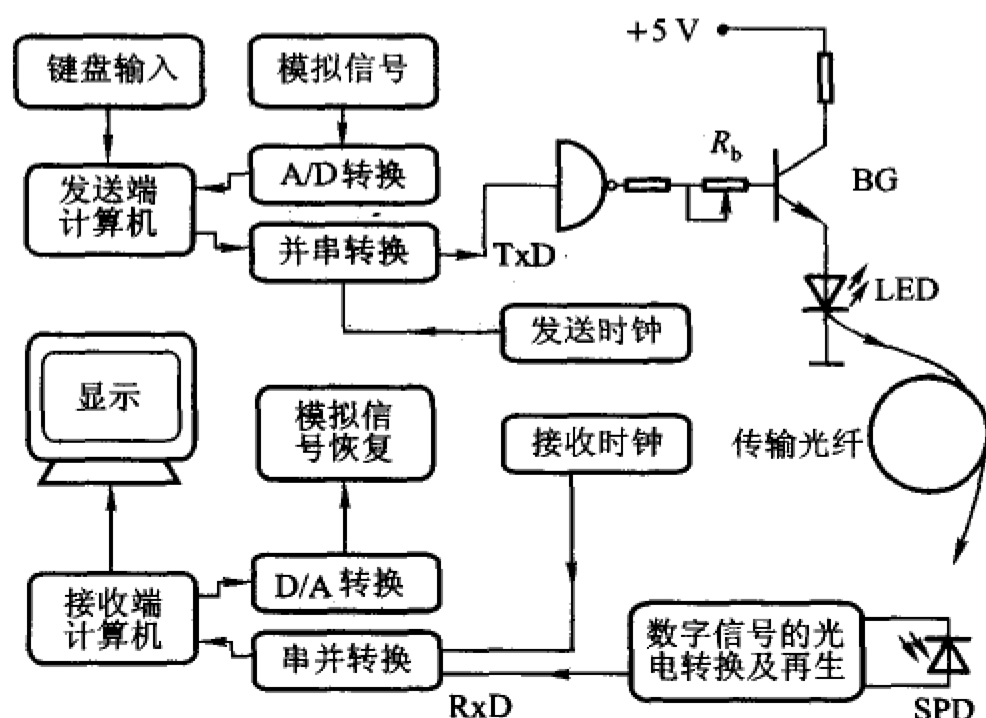


图 A－14－1　计算机控制的光纤传输系统

算机及具有 A/D、D/A 转换和数字信号的并串、串并转换功能的电端机；⑤ 时钟系统；⑥ 模拟信号源. 其中，光信号的检测和再生部分是影响系统正常工作与否和传输性能好坏的关键部分. 以下将着重对其结构、原理和性能进行理论分析，并提出相应的实验研究方法.

1. 光信号检测和再生电路的结构及工作原理

电路结构如图 A－14－2 所示，它由以硅光电二极管 SPD 为检测元件的光电变换、电压放大和反相电路等三部分组成. 它的输入是来自传输光纤波长为 0.86 μm 数字式光信号，输出送往 8251A 通信接口芯片的数据接收端（RxD 端），其任务是把数字式光信号再生成数字式电信号并且要求再生信号的码元持续时间与发送端数字信号的码元持续时间相同. 由于 8251A 的数据发送端（TxD）和接收端（RxD）在系统处于空闲状态时均为高电平的“1”态，为了延长光电器件的使用寿命，规定传输光纤中，无光代表数字信号的“1”，有光代表数字信号的“0”. 另外，由于光导纤维对于光信号具有很宽的频带以及 SPD 对光脉冲具有快速响应的性能，所以在图 A－14－1 所示系统的许多实际应用场合下（在这些场合下，对传输距离和传输速率的要求均不是很高）进行理论分析时，可以不考虑光信号在光纤内传输过程中产生的畸变，并可认为 SPD 中的光电流对光脉冲的响应是瞬时的.

（1）数字信号光电转换的静态分析

参看图 A－14－2，在系统传输 1 码时，传输光纤中无光，SPD 中电流近似为 0，此时只要电路元件 R_{b1}、R_{b2} 和 R_c 的阻值选择适当，使 BG1 处于足够深度的饱

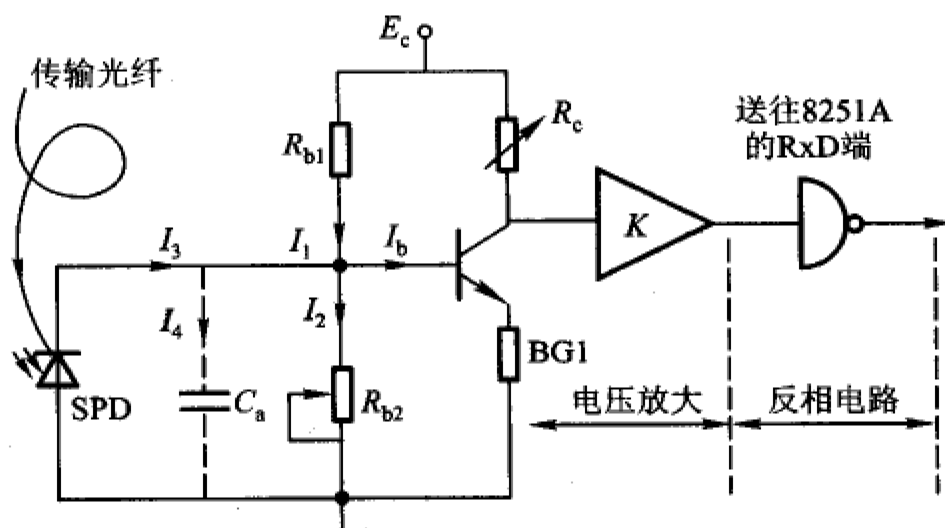


图 A-14-2 数字式光信号的检测及再生电路

和状态，其集、射极间的电压 V_{ces} 很低，即使经过电压放大也仍可使反相器输出保持在高电平状态. 为此，要求此时流入 BG1 的基极电流 I_{b1} 必须满足以下关系：

$$I_b = I_{b1} = \frac{E_c}{R_{b1}} - \frac{V_{be}}{R_{b12}} > \frac{E_c}{\beta R_c} \qquad (A-14-1)$$

其中 R_{b12} 为 R_{b1} 和 R_{b2} 的并联值，V_{be} 为 BG1 的基射极电压，β 是它的电流放大系数.

在传输 0 码时，传输光纤中有光，SPD 中有与光功率成正比的光电流 I_3 从其负极流向正极，使 BG1 的基极电流 I_b 从 I_{b1} 减小到 I_{b2}，只要光电流 I_3 足够大，就可使 BG1 脱离深度饱和状态进入放大状态，使其集电极电压 V_{ce} 升高. 当它升高到使电压放大电路的输出电压达到反相器输出电平由高到低转换所需的阈值电压 V_1 时，反相器输出为低电平. 为此，要求流过 SPD 的光电流 I_3 应满足以下条件：

$$I_3 = I_{b1} - I_{b2} \geqslant I_{b1} - \frac{E_c - (V_1/K)}{\beta R_c} \qquad (A-14-2)$$

其中 K 为电压放大电路的放大倍数.

(A-14-1)、(A-14-2)两式仅是检测再生电路实现 1 码和 0 码静态光电转换所需的条件，但是系统在传输数字信号时，0 码和 1 码的持续时间有限，并且是随机出现的，所以经常会出现 1 码和 0 码交替传输的情形，对应这一情形，检测和再生电路输出电平在高、低两种电平间变化. 由于电路中储能元件（主要是分布电容）的存在，这种变化不是瞬时完成的，而是有一个过渡过程，当系统的数码传输率很高时，这一过程所经历的时间可与原有信号码元持续时间相比较，从而使再生信号码元持续时间与原有信号码元持续时间不等，当它们之间的差值超过了接收端码值判别时钟所允许范围时，就会产生误码. 为了明确

信号再生条件与电路参数的关系，应对上述过渡过程进行理论分析.

（2）数字信号光电转换的动态分析

参看图 A－14－2，其中 C_a 是包括 SPD 的结电容、BG1 基－射极间的输入电容及 SPD 和 BG1 间的接线电容在内的总电容，根据节点电流定律，图中各电流的值应满足以下方程：

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_b(t) \tag{A-14-3}$$

其中

$$I_b(t) = I_{b0} \cdot \exp[eV_{be}(t)/kT], \quad I_4 = C_a \frac{dV_{be}}{dt} \tag{A-14-4}$$

上式中 e 为电子电荷量的绝对值，k 为玻耳兹曼常量，T 为热力学温度.

由于 C_a 的存在，当输入端发生光脉冲从无到有的变化时，V_{be} 不能突变，所以式（A－14－3）中除 I_3 外，各电流值都要经历一个随时间的变化过程，但与 I_4 和 I_b 相比，I_1、I_2 的变化幅度相对说来较小. 为了简化理论分析，我们在以后的讨论中近似认为 I_1 和 I_2 为不变量，并考虑到 $I_1 - I_2 - I_3 = I_{b1} - I_3 = I_{b2}$ 关系，由（A－14－3）、（A－14－4）两式得

$$C_a \frac{dV_{be}}{dt} = I_{b2} - I_{b0} \cdot \exp[eV_{be}/kT] \tag{A-14-5}$$

求解微分方程（A－14－5），并根据初始条件，即 $t=0$ 时，$I_b(0) = I_{b1} = I_1 - I_2$，可以获得 BG1 基极电流在上述过渡过程中随时间的变化规律为

$$I_{b12}(t) = I_{b2} \Big/ \left[1 - \left(\frac{I_3}{I_{b1}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{eI_{b2}t}{kTC_a}\right)\right] \tag{A-14-6}$$

用同样方法可求得当光脉冲从有到无变化时，BG1 基极电流的变化规律 $I_{b21}(t)$ 为

$$I_{b21}(t) = I_{b1} \Big/ \left[\frac{I_3}{I_{b2}} \cdot \exp\left(-\frac{eI_{b1}t}{kTC_a}\right) + 1\right] \tag{A-14-7}$$

根据式（A－14－6）、（A－14－7）可以求出 $I_{b12}(t)$ 从 I_{b1} 到（$I_{b1} - 90\% \cdot I_3$）的下降时间 t_d 和 $I_{b21}(t)$ 从 I_{b2} 到（$I_{b2} + 90\% \cdot I_3$）的上升时间 t_r 为

$$t_d = (kTC_a/eI_{b2}) \cdot \ln(10 - 9I_3/I_{b1}) \tag{A-14-8}$$

$$t_r = (kTC_a/eI_{b1}) \cdot \ln(10 + 9I_3/I_{b2}) \tag{A-14-9}$$

为了使检测再生电路工作正常，输入光信号的码元持续时间 t_{in} 必须大于 t_d 和 t_r 中较大的一个值，所以 t_d 和 t_r 的大小决定了检测再生电路的最大传输率.

知道 $I_{b12}(t)$ 和 $I_{b21}(t)$ 后，就可以得到图 A－14－2 中 BG1 的集电极电压 V_{ce} 和电压放大电路的输出电压 V 随时间变化的关系：

$$V_{ce}(t) = E_c - \beta I_b(t) R_c, \quad V = KV_{ce}(t)$$

若设反相器输出端从高（低）电平到低（高）电平转换的阈值输入电压为

$V_1(V_2)$；光脉冲从无到有变化时，$V_{ce}(t)$从V_{ces}上升到V_1/K所需的时间为t_1和光脉冲从有到无变化时，$V_{ce}(t)$从稳定值V_{02}（等于$E_c-\beta I_{b2}R_c$）下降到V_2/K所需的时间为t_2，则再生信号1码元的持续时间

$$t_{reg}=t_{in}-t_2+t_1 \tag{A-14-10}$$

根据以上定义，不难求出t_1和t_2：

$$t_1=\frac{kTC_a}{eI_{b2}}\cdot\ln\left[\frac{(E_c-V_1/K)\cdot I_3}{(E_c-V_1/K-\beta R_cI_{b2})I_{b1}}\right] \tag{A-14-11}$$

$$t_2=\frac{kTC_a}{eI_{b1}}\cdot\ln\left[\frac{(E_c-V_1/K)\cdot I_3}{[(\beta I_{b1}R_c)-E_c+V_2/K]I_{b2}}\right] \tag{A-14-12}$$

为了使再生信号的码元持续时间与原信号的码元持续时间相等，就要求$t_1=t_2$，但由于8251A对接收信号码值的判定是在相当于原有信号码元持续时间的中间时刻进行的[1]，所以对于图A-14-1所示系统，从理论上讲，允许t_{reg}与t_{in}有$0\sim\pm t_{in}/2$范围内的差异. 但考虑到时钟抖动等不稳定因素，为了使检测再生电路更加可靠地工作，我们规定数字信号的再生条件为

$$t_{reg}=(1\pm0.25)t_{in}$$

所以，在满足式（A-14-1）和（A-14-2）所确定的静态条件的情况下，调节电路参数使得$t_1-t_2=0\sim\pm0.25t_{in}$时，就可实现数字信号的再生.

灵敏度和最大传输率是衡量数字信号光电检测及再生电路性能好坏的两个重要技术指标. 前者是指在实现信号再生功能的前提下传输0码时入射到SPD光敏面上所需的最小光功率. 由（A-14-1）、（A-14-2）两式知，选用β值高的晶体管和增加BG1的R_c和电压放大电路的放大倍数K对于提高检测再生电路的灵敏度十分有利. 由（A-14-8）、（A-14-9）两式可知，采用能使C_a减少的光电器件、晶体三极管和布线工艺是提高检测再生电路最大传输率的有效途径. 对最大传输率的要求应由整个系统的用途而定. 对于传递语音信息的系统，由于语音信号的频谱范围在300～3 400 Hz之间，根据Nyquist采样定理，对声信息进行A/D转换时的采样频率应为8 000 s^{-1}. 若模数转换结果用8位二进制数表示，加上发送端8251 A对数字信号进行并/串转换时附加的起始位、校验位和终止位，对整个系统的最大传输率的要求不得低于88 kb/s. 对于传输图像的系统，则要求具有更高的传输率.

2. 实验研究方法

系统的基本结构如图A-14-1所示，工作过程如下：从发送端计算机键盘输入ASCII字符的十进制数的代码（0～127 d），在程序的控制下转换成相应的二进制代码存放入CPU的AL寄存器中，然后反复（反复次数可按需要改变）送往8251A芯片进行数字信号的并串转换，转换结果是具有起始位、校验位和终止位的串行数据流，经8251A的TxD端输出，并对半导体发光二极管LED的光

强进行调制，产生的数字式光信号经传输光纤送到检测再生电路的 SPD 的入照窗口，检测再生电路输出的再生信号经 8251A 进行串/并转换后再送入接收端计算机 CPU 的 AL 寄存器并在屏幕上显示出相应的字符（其目的是为了监视传输过程中的误码情况）. 此外，用示波器观测再生信号的波形，可以考察再生信号码元持续时间随电路参数和输入光功率的变化情况.

根据以上原理和实验方法，对图 A－14－1 所示系统已研制成了 DOF－D 型数字信号光纤传输技术实验仪（详见使用说明书），其中具有 A/D、D/A 转换和数字信号并/串、串/并转换功能的通信接口电路组装在与 DOF－D 型实验仪主机配套的电端机内. 电端机是一个单片机控制系统，单片机通过 RS－232 串口接收来自计算机的命令去控制 ADC0809、DAC0832 和 8251 进行 A/D、D/A 转接和信号的并/串、串/并转换.

实验内容

1. LED－传输光纤组件电光特性的测定①

进行这项测量时，按 DOF－D 型实验仪使用说明做好系统的连接后用导线将“TxD”端对地短路就可使 LED 发光，调节仪器面板上与图 A－14－1 所示系统中电位器 R_b 对应的调节旋钮，就可改变 LED 输出光功率的大小. 记下毫安表不同读数下这一光功率值，就可获得 LED－光纤组件的电光特性.

2. 硅光电二极管（SPD）在 LED 发光波长下响应度的测定②

方法：采用 $I-V$ 变换技术进行 SPD 光电流的测量.

步骤：自拟.

要求：根据实验数据计算响应度.

3. 数字信号静态光电转换的实验研究

任务：研究光电转换及再生电路中 BG1 的饱和深度与实现静态数码光电转换所需高光平功率值的关系.

步骤：自拟.

要求：比较实验与理论分析结果.

4. 数字信号光电转换动态过程实验研究

（1）准备工作

进行这项测量时，按 DOF－D 型实验仪使用说明做好系统的连接后，打开 DOF－D 型实验仪、电端机和计算机电源. 运行本实验系统的控制软件 DOF125.

①② 若在此之前，已做了音频信号的光纤传输技术实验，本项实验可以不做，有关数据可由实验室直接给出.

EXE，在PC机屏幕上出现的“菜单”提示下，敲击数字键三次，在0～127 d数值范围内键入任一ASCII字符代码的十进制数．在此之后，计算机将会把这一十进制数转换成相应的八位二进制数存入AL寄存器，并不断送往8251A芯片进行数据的并/串转换，加上起始位、校验位和终止位后，从8251A的数据发送端“TxD”脚输出并对LED的光强进行调制，产生供实验研究用的数字式光信号．用鼠标点击计算机界面上的“停止”键时，传输系统停止发送数据．

（2）实验研究

运行随仪器提供的配套软件，让系统以125 kb/s的传输率反复传输十进制代码为85 d的ASCII字符“U”，并用示波器观察光电转换及再生电路输出的电压波形在以下两种情况下的变化情况：

① 当BG 1的饱和深度一定时，用示波器观测再生信号1码元宽度随输入信号高光平功率大小的变化情况．

② 当输入光信号高光平的光功率为一定值（比如10 μW）时，用示波器观测再生信号1码元宽度随BG1饱和深度的变化情况．

③ 从灵敏度和可靠性要求出发，在BG1的饱和深度和输入光功率的允许变化范围内，选择一个适当的配合使再生信号的1码元宽度为8 μs．然后让系统在0～127 d范围内传送任意ASCII码字符，并用示波器和计算机的显示器考察传输结果．如果在传输过程中虽然再生信号“1”码元宽度能维持在8 μs状态，但计算机屏幕上仍有误码显示．这时应适当减小发送端LED发光时的光功率值，并调节图A－14－2中R_{b2}，使BG1的饱和深度降低，直到传输系统无误码出现为好．

④ 让系统在程序控制下传输语言信号，用示波器观测对模拟信号进行A/D转换时的采样周期；并运用Nyquist抽样定理分析观测结果．

参考文献

[1] 高传善，等．接口与通信．上海：复旦大学出版社，1989

实验A－15　光导纤维中光速的实验测定

目的

1．学习光纤中光速测定的基本原理；

2．熟悉数字式异或逻辑相位检测器原理、特性测试方法；

3. 掌握光纤中光速测定系统的调试技术.

仪器和用具

FOV－B 型光导纤维中光速测定实验仪、双踪示波器.

原理

光纤中光速的测定是一个十分有趣的实验,通过这一实验能使学生亲身感受到光在介质中传播的真实物理过程和深刻了解介质折射率的物理意义.

本实验提出一种采用方波调制信号,应用具有异或逻辑功能的门电路进行相移测量的方法.由这种电路所组成的相位检测器结构简单,工作可靠,相移－电压特性稳定.在光纤折射率 n_1 已知的情况下,利用这种方法还可进行光纤长度的测定.

1. 光纤中光的传播

光导纤维的结构如图 A－15－1 所示,它由纤芯和包层两部分组成,纤芯半径为 a,折射率为 $n_1(\rho)$,包层的外半径为 b,折射率为 n_2,且 $n_1(\rho)>n_2$.从物理光学的角度考虑,光波实际上是一种振荡频率很高的电磁波,当光波在光导纤维中传播时,光导纤维实际就是一种光波导.应用电磁场理论中 $\boldsymbol{E}$ 矢量和 $\boldsymbol{H}$ 矢量应遵从的麦克斯韦方程及它们在芯纤和包层界面处应满足的边界条件可知:在光导纤维中主要存在着两大类电磁场形态.一类是沿光纤横截面呈驻波状,而沿光导纤维轴线方向为行波的电磁场形态.这种形态的电磁场其能量沿横向不会辐射,只沿轴线方向传播,故称这类电磁场形态为**传导模式**;另一类电磁场形态其能量在轴线方向传播的同时沿横向方向也有辐射,这类电磁场形态称为**辐射模式**.利用光导纤维传输光信息就是依靠光纤中的传导模式.随着光导纤维芯半径 a 的增加,光导纤维中允许存在的传导模式的数量也会增多.纤芯中存在多个传导模式的光纤称为多模光纤.当光纤芯径小到某一程度后,纤芯中只允许称为基模的一种电磁场形态存在.这种光纤就称为单模光纤.目前光纤通信系统上使

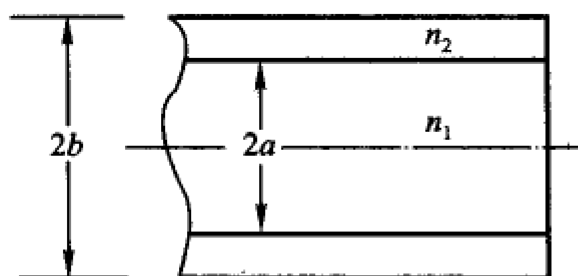


图 A－15－1　阶跃型多模光纤结构示意图

用的多模光纤纤芯直径为 50 μm,包层外径为 125 μm. 单模光纤的芯径范围为 5 ~ 10 μm,包层外径也为 125 μm. 在纤芯范围内折射率不随径向坐标 ρ 变化,即 $n_1(\rho) = n_1$ = 常数的光纤,称为阶跃型光纤,否则称渐变型光纤. 对于上述各种光纤的传光原理及传光性能的详尽理论分析见文献[1].

当一光束由光导纤维的入射端耦合到光导纤维内部之后,会在光纤内同时激励起传导模式和辐射模式,但经过一段传输距离,辐射模的电磁场能量沿横向方向辐射耗尽后,只剩下传导模式沿光纤轴线方向继续传播. 在传播过程中只会因光导纤维纤芯材料的杂质和密度不均引起的吸收损耗和散射损耗外,不会有辐射损耗. 目前的制造工艺能使光导纤维的吸收和散射损耗达到很小的程度,所以传导模式的电磁场能在光纤中传输很远的距离.

假设光纤的几何尺寸和折射率分布具有轴对称和沿轴向不变的特点,这样我们就能将光纤中光波的电磁场矢量 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{H}$ 表示为

$$\begin{Bmatrix} E \\ H \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} e(\rho,\varphi) \\ h(\rho,\varphi) \end{Bmatrix} \cdot \exp[\mathrm{i}(\omega t - \beta z)] \tag{A-15-1}$$

此处(ρ,φ)是把光纤轴线取作 z 轴方向的圆柱坐标系中的坐标变数,$\omega = 2\pi\nu$ 是光波的角频率,ν 是光波的频率,而 β 是光导纤维中所论传导模式电磁波的轴向传播常数.

对于光纤中允许的每种传导模式都有各自的轴向传播常数,但是根据理论分析可知:光纤中的传导模式的轴向传播常数 β 的取值只能是在

$$k_2 < \beta \leqslant k_1$$

范围内那些使 $\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{H}$ 矢量在光纤纤芯 - 包层界面处满足边界条件的一些不连续值[1],其中 $k_1 = n_1 k_0$,$k_2 = n_2 k_0$,而 $k_0 = (\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0)^{1/2}$ 是所论光波在自由空间中的传播常数. 根据式(A - 15 - 1),具有轴向传播常数 β 的某一传导模式的电磁波,沿光纤轴线的传播速度为

$$v_z = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi\nu}{\beta} \tag{A-15-2}$$

对于通信用的石英光纤,纤芯折射率一般在 1.5 左右,包层折射率 n_2 与 n_1 的差异只有 0.01 的量级,故各传导模式到达光纤终点的时间差异与它们所需的平均传播时间的比值不会大于 0.66%,而实际值比这一百分比要小得多! 所以在测定光导纤维光速的实验中可近似认为各种传导模式是“同时”到达光纤另一端的,这一近似与测量装置的系统误差相比是完全允许的. 根据以上论述,光导纤维中光速的表达式可近似为

$$v_z = \frac{2\pi\nu}{\beta} = \frac{2\pi\nu}{k_1} = \frac{2\pi\nu}{k_0 n_1} = \frac{c}{n_1} \tag{A-15-3}$$

其中 $c = 2\pi\nu / k_0$ 是光波在自由空间中的传播速度.

2. 光导纤维中光速的测量

(1) 实验装置的方框结构图

图 A－15－2 是测定光导纤维中光速实验装置的方框结构图，在该图中由调制信号源提供周期为 T，占空比为 50% 的方波电信号对半导体发光二极管 LED 的光强进行调制，调制后的光信号经光导纤维、光电检测器件和信号再生电路再次变换成一个周期为 T，占空比为 50% 的方波电信号，但这一方波电信号相对于调制信号源输出的原始方波电信号有一定的延时，这一延时包括了 LED 驱动与调制电路、光电转换及信号再生电路引起的延时，也包含要测定的光信号在给定长度光纤中所经历的时间在内.

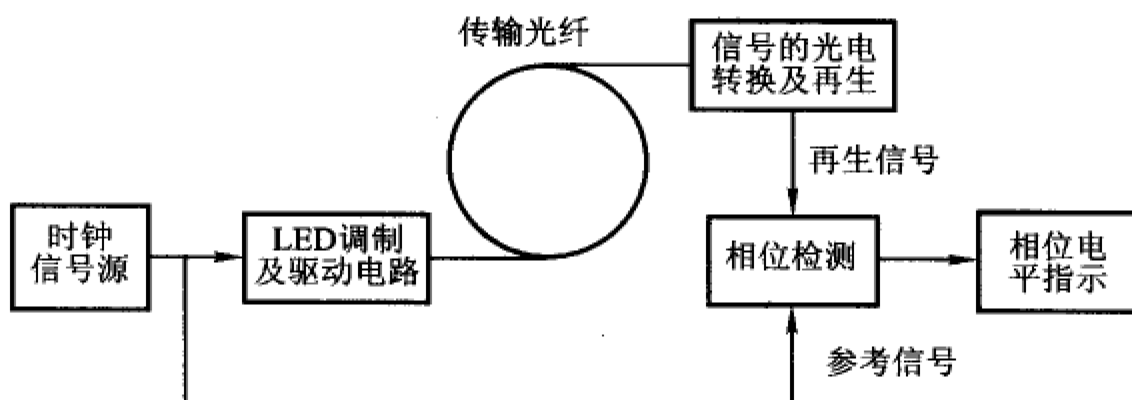


图 A－15－2　测定光导纤维中光速实验装置的方框图

(2) 相移测量方法

如果把再生信号和原始调制信号接到一个具有异或逻辑功能的门电路的两个输入端，则在 $0\sim\pi$ 的相移所对应的延时范围（即 $0\sim T/2$）内，该电路的输出波形就是一个周期为 $T/2$，但脉宽与以上两路信号的相对延时成正比的方波序列（图 A－15－3），这一方波序列的直流分量的电平值就与以上两路输入信号的相对延时成正变关系. 用示波器可观察到异或逻辑电路输出的方波序列占空比随延时变化的情况；用直流电压表可以测出这一方波序列的直流分量的电平值.

利用异或逻辑电路所组成的相位检测电路的相移－电压特性曲线如图 A－15－4 所示，其中 V_L 是 $2n\pi(n=0,1,2,\cdots)$ 相移时异或门输出的低电平值，V_H 为 $(2n+1)\pi(n=0,1,2,3,\cdots)$ 相移时异或门输出的高电平值. 在 $0\sim\pi$ 的相移范围内相位检测电路输出的方脉冲序列的直流分量的电平值 V_0 与两输入信号相移之间的关系为

$$\Delta\varphi=\frac{V_0-V_L}{V_H-V_L}\pi$$

对应的延时关系为

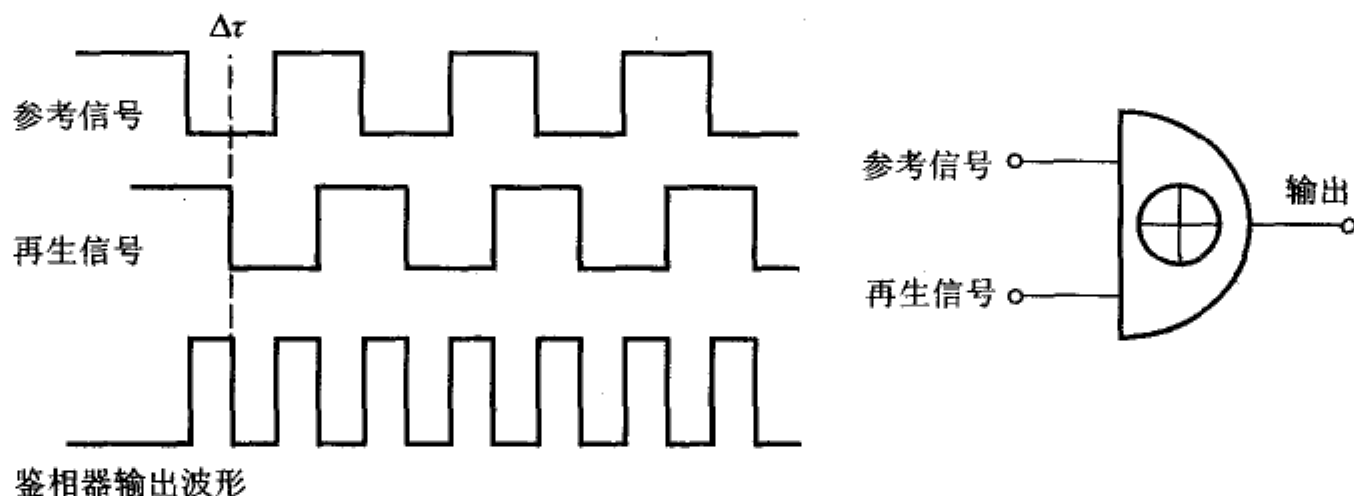


图 A－15－3　相位检测器原理图

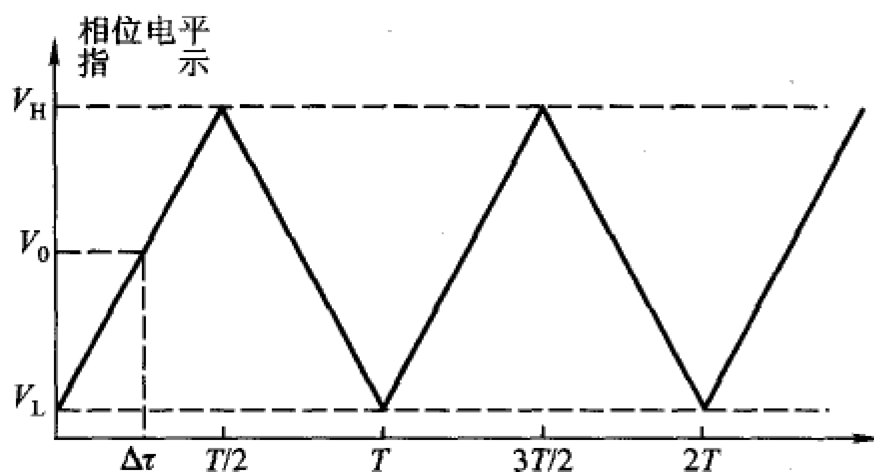


图 A－15－4　相位检测电路的相移－电压特性曲线

$$\Delta\tau=\frac{V_0-V_L}{V_H-V_L}\cdot\frac{T}{2} \qquad (A-15-4)$$

其中 $\Delta\tau$ 为两路信号的相对延时，T 为调制信号的周期，可用示波器测得. 具体测量时，先用一长度为 L_1 的长光纤接入测量系统，测得相位检测器输出的直流分量的电平值为 V_{01}，然后用长度为 L_2 的短光纤代替长光纤，并在保持测量系统电路参数不变（也即保证两种测量状态下由于电路因素引起的延时一样）的状态下，测得相位检测电路输出的直流分量的电平值为 V_{02}，则调制信号在（L_1-L_2）长度的光纤中传播时所经历的时间就等于

$$t=\frac{V_{01}-V_{02}}{V_H-V_L}\cdot\frac{T}{2}$$

对应的传播速度为

$$v_z=\frac{L_1-L_2}{t}=\frac{2(L_1-L_2)(V_H-V_L)}{T(V_{01}-V_{02})} \qquad (A-15-5)$$

利用式（A－15－5）我们就可根据由以上测量系统所获得的实验数据计算出光

导纤维中光波的传播速度.

(3) 调制信号的光电转换及再生

由传输光纤输出周期为 T,占空比为 50% 的方波光信号在接收端经过硅光电二极管 SPD、再生电路(如图 A－15－5 所示)可再变成周期为 T,占空比仍为 50% 的方波电信号. 方波光信号光电转换及再生电路的工作原理如下：

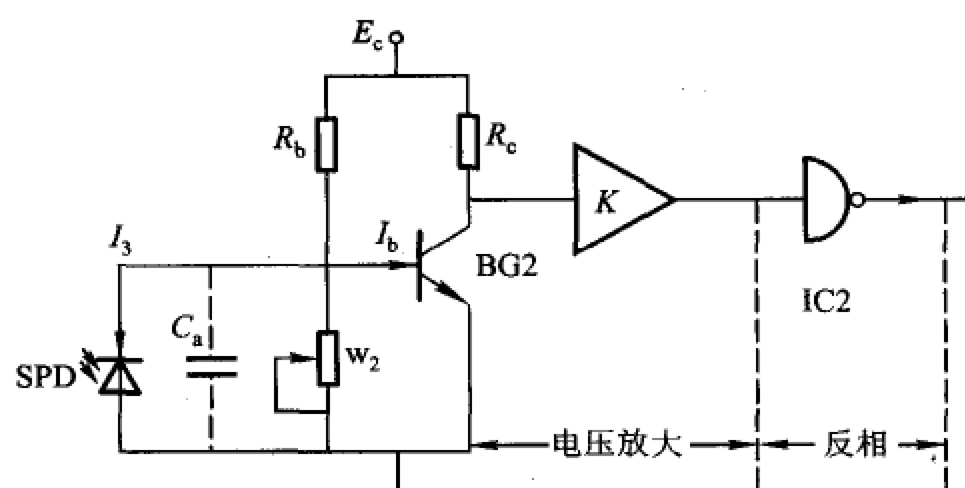


图 A－15－5　调制信号的光电转换及再生

当传输光纤中无光时,硅光电二极管无光电流流过,这时只要 R_c 和 R_{b2} 的阻值适当,晶体管 BG2 就有足够大的基极电流 I_b 注入,使 BG2 处于深度饱和状态,因此它的集电极和发射极之间的电压极低,即使经过放大电路放大后也会使反相器 IC2 的输出电压维持在高电平状态. 当传输光纤中有光时,光电二极管有光电流 I_3 产生,它是从 SPD 的负极流向正极,对 BG2 的基极电流具有拉电流作用,使 BG2 的基极电流减小. 由于 SPD 结电容、其出脚连接线的线间电容以及 BG2 基－射极间杂散电容的存在(在图 A－15－5 中用 C_a 表示以上三种电容的总效应),使得 BG2 基极电流的这一减小过程不是突变的,而是按某一时间常数的指数规律变化. 随着 BG2 基极电流的减小,BG2 逐渐脱离深度饱和状态,向浅饱和状态和放大区过渡,其集电极－发射极间的电压 V_{ce} 也开始按指数规律逐渐上升. 由于后面的放大器放大倍数很高,故还未等 V_{ce} 上升到其渐近值,放大器输出电压就达到能使反相器 IC2 状态翻转的电压值,这时 IC2 输出端为低电平. 在下一个传输光纤中无光状态到来时,接收端的 SPD 无光电流,BG2 的基极电流 I_b 又按指数规律逐渐增加,因而使 BG2 原本按指数规律上升的 V_{ce} 在达到某一值时就停止上升,并在以后按指数规律下降. V_{ce} 下降到某一值后,IC2 由低电平翻转成高电平. 适当调节发送端 LED 的工作电流(即改变 LED 的发光强度)和接收端 SPD 无光照射时 BG2 饱和深度(调节 w_2)之间的配匹情况,可使光电转换及再生电路输出一个周期为 T,占空比为 50% 的方波电信号.

实验内容

本实验使用的主要仪器是 FOV－B 型光导纤维中光速测定实验仪. 它是根据双光纤法及方波信号光电转换和再生原理制作而成的新型教学实验仪器，由主机、相位检测器和双光纤信道三部分组成（有关该仪器的详细说明见 FOV－B 型光导纤维中光速测定实验仪使用说明书）. 配以双踪示波器，利用该仪器可按示波器法和相位检测器法两种不同方式进行光导纤维中光速的实验测定：

1. 示波器法

利用示波器法测光纤中光速时的连接如图 A－15－6 所示. 其中光纤信道左边部分为 LED 的调制和驱动电路；光纤信道右边部分为方波光信号的光电转换及再生电路. 调制信号的周期为 16 μs，占空比为 50%.

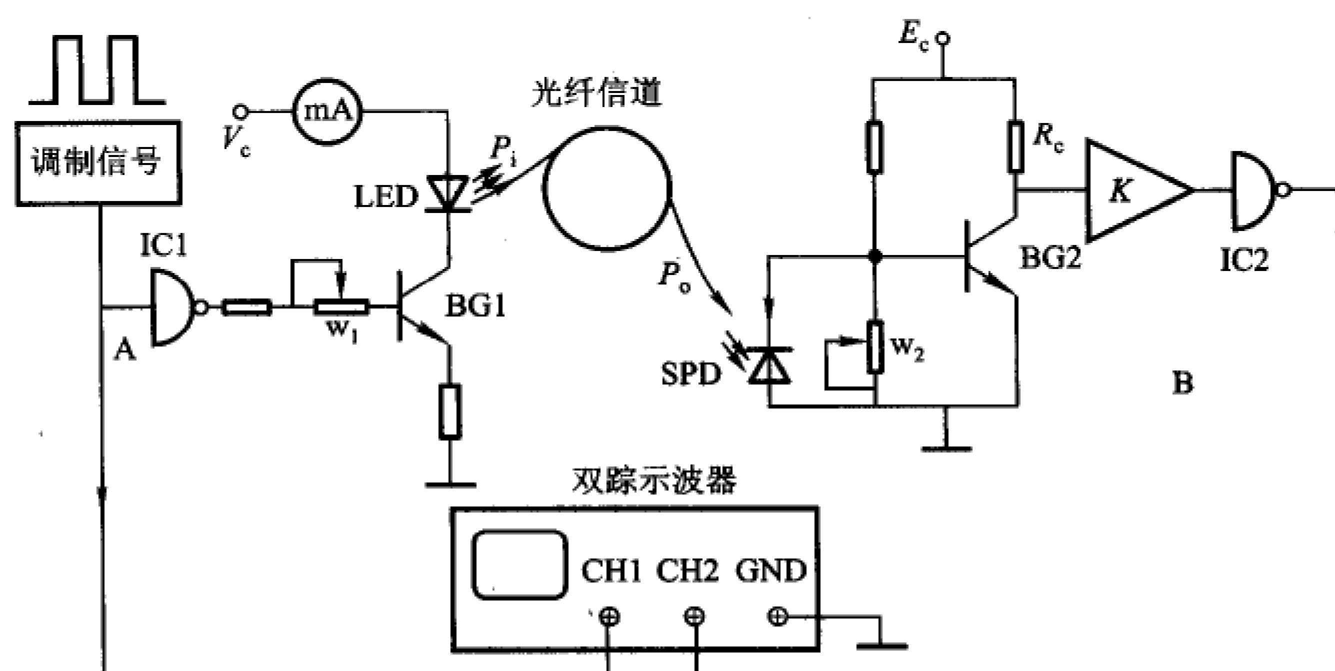


图 A－15－6 示波器法测定光导纤维中光速的实验连接图

先把长度为 L_1 的光纤信道接入测量系统，调节 w_1 使 LED－光纤组件在调制状态下输出的平均光功率等于 20 μW（用 FOV－B 型实验仪提供的光功率计测定），然后保持 w_1 位置不变，观察和比较双踪示波器 CH1、CH2 通道所显示的波形. CH1 的波形是占空比为 50%，周期为 16 μs 的方波，但 CH2 波形的占空比不一定为 50%. 这时需调节 w_2 旋钮以改变晶体管 BG2 的饱和深度，可使 CH2 波形也是占空比为 50% 的方波. 当测量系统达到这一状态时，从示波器上读出 CH2 通道的波形相对于 CH1 通道波形的延迟时间 τ_1. 保持 w_1 和 w_2 调节旋钮的位置不变，用长度为 L_2 光纤信道代替 L_1 光纤信道接入测量系统，此时示波器

CH2 通道方波的占空比一般情况下不再是 50%. 为了使 CH2 波形的占空比为 50%，测量系统的电路参数又要保持不变，这只有靠调节 L_2 光纤信道光纤输出端与 SPD 的光耦合状态使 CH2 的波形占空比达到 50%. 测量系统达到这一状态后，从示波器读出 CH2 波形相对于 CH1 波形的延迟时间 τ_2. 根据实验数据，光纤中的光速可按以下公式算出：

$$v_z = (L_1 - L_2)/(\tau_1 - \tau_2)$$

2. 相位检测器法

利用相位检测器法测光纤中光速的连接如图 A－15－7 所示. 按图 A－15－7 所示连接好测量系统后，重复示波器法测量相移的全部操作. 在再生信号占空比为 50% 状态下，记下 L_1 光纤信道和 L_2 光纤信道相位检测器相移电平指示器的读数 V_1 和 V_2. 根据实验数据，按式(A－15－5)计算光纤中的光速.

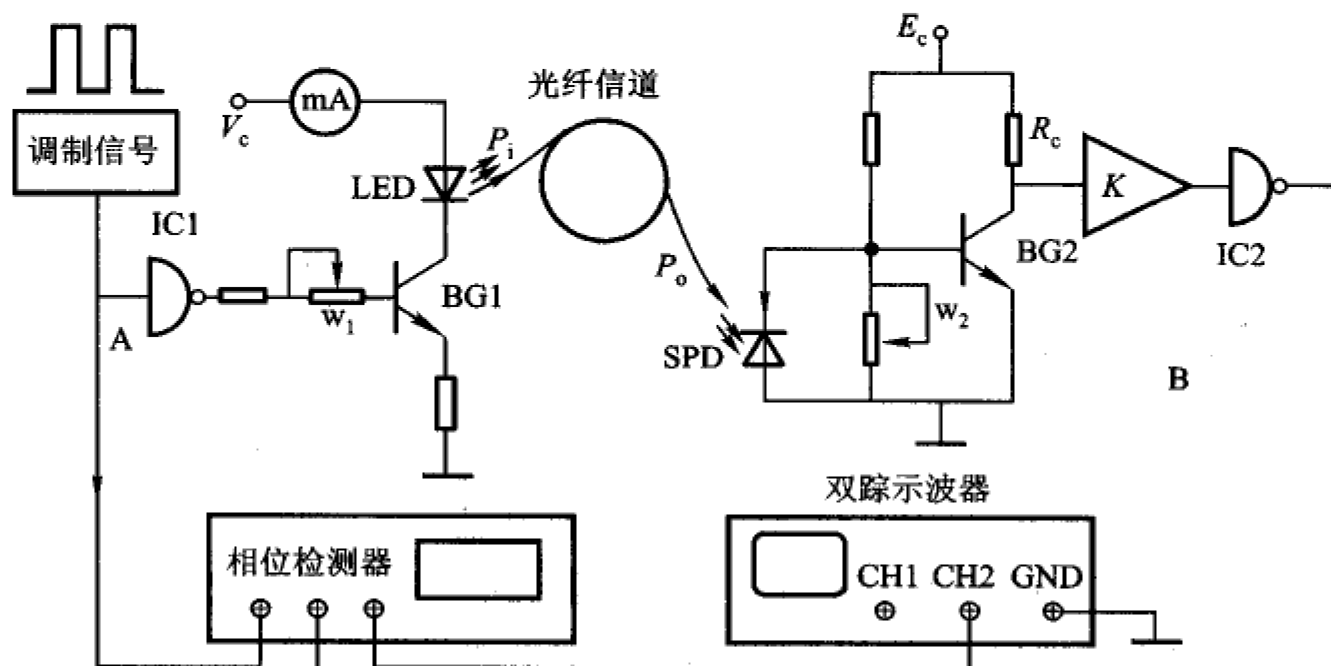


图 A－15－7　相位检测器法测定光纤中光速的连接

式(A－15－5)中，V_H 和 V_L 分别是相位检测器同相输入和反相输入两种情况下相移电平指示器的读数. 它们可由 FOV－B 型实验仪提供的相移为 180°的两种方波信号源测得.

思考题

1. 说明为何取 $\tau = 16\ \mu s$?
2. 如果不给出 T 值，应如何进行实验？

参考文献

[1] 朱世国,付克祥. 纤维光学——原理及实验研究. 成都:四川大学出版社,1998

实验 A-16 数字电表及其在非电量测量中的应用设计

目的

1. 学习双斜式数字电表的基本工作原理;
2. 了解 7107 模数转换集成电路的引脚功能、外围元件的作用及参数选择原则;
3. 掌握数字电压表头及运放电路在传感器设计中的应用技术;

仪器和用具

DMST-A 型数字电表及传感器设计实验仪、PN 结电压型温度传感探头、数字万用表、低频示波器、79HW-1 型磁力搅拌加热器.

若采用其他物理量的传感探头进行传感器设计实验,则应配置能使相应物理量发生变化的其他设备,比如光源设备、力学量加载设备,等等.

原理

1. 双斜式模数转换电路的基本工作原理

在一定时间 T_1 内若对极板上电荷为零的电容器 C 充电,充电电流恒定并且与待测电压 V_x 成正比,则电容器 C 两极板上积累的电荷(或两极板间的电压)随时间线性增加,并在 T_1 结束时刻所积累的电荷 Q_0 也与 V_x 成正比. 在此以后若让电容器放电,而放电电流与参考电压 V_{ref} 成正比,则电容器两极板上的电荷 Q_c 就会从 Q_0 线性减少. 设 Q_c 减至零时所经历的时间为 T_2. 在以上过程中,由于电容器 C 在充电结束时刻(即放电的开始时刻)所积累的电荷 Q_0 与 V_x 成正比,所以 T_2 也与 V_x 成正比. 如果用一计数器在 T_2 开始时刻对时钟脉冲进行计数,在 T_2 结束时刻停止计数,则 T_2 时期内计数器的读数 N_2 就与 V_x 成正比. 这就是

双斜式模数转换电路的基本工作原理.

目前常用的3位半数字万用表就是用CMOS的7106/7型单片A/D转换器构成. 这些A/D转换器的工作原理就是基于以上电容器充、放电过程中计数器读数 N_2 与 V_x 成正比的基本关系. 图A－16－1是双斜式A/D转换器的结构框图及工作原理图, 为了保证电容器 C 的充、放电过程是恒流过程, 采用了由运算放大器 A_1 组成的积分电路. 整个转换过程分为三阶段:

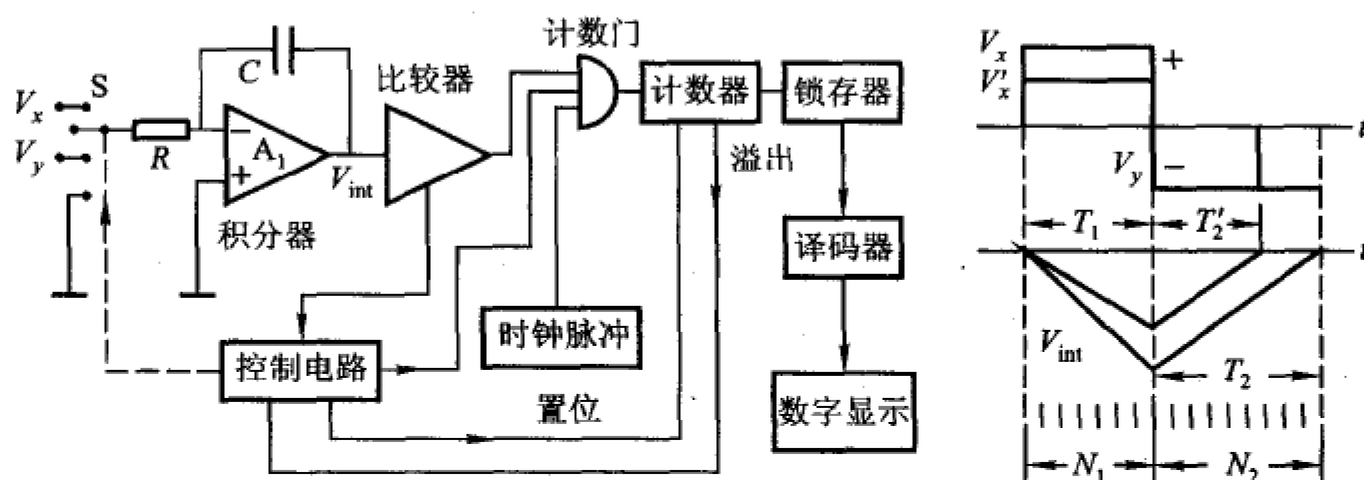


图 A－16－1　双斜式A/D转换器的工作原理及结构框图

第一阶段, 通过控制电路使有关模拟开关(图A－16－1中未画出)闭合, 放掉由于各种原因使电容器 C 两极板上积累的电荷, 并在这一阶段, 通过控制开关使参考电压 V_{ref} 对0.1 μF的参考电容 C_{ref} 充电到 V_{ref} 值. 这一阶段称为自动调零阶段.

第二阶段, 称取样阶段, 在这阶段控制电路令模拟开关S将被测电压 V_x 与积分器相连, 电容器 C 开始以恒定电流 V_x/R 充电, 与此同时打开计数门, 计数器开始计数, 当计数器计到某一确定值 N_1 时溢出, 控制电路令取样过程结束, 因此取样时间 T_1 是固定的. 取样阶段结束时刻积分器的输出电压 $V_0=Q_0/C$, 其中 Q_0 为取样阶段结束时刻积分电容 C 上积累的电荷. 因取样阶段的充电电流为 V_x/R, 故 T_1 期间积分电容 C 上积累的电荷为

$$Q_0=\int_0^{T_1}\frac{V_x}{R}\mathrm{d}t=\frac{V_x}{R}\cdot T_1,\quad \text{则}\ V_0=\frac{Q_0}{C}=-\frac{V_x}{RC}\cdot T_1 \quad (\text{A}-16-1)$$

式(A－16－1)等号右边的负号表明 V_0 与 V_x 具有相反的极性, 这是因为如果 V_x 为正, 则图A－16－1中电容器 C 右极板带负电荷, 故 V_0 极性为负; 反之, V_0 为正.

第三阶段称为测量阶段, 在此阶段, 控制电路首先对被测电压 V_x 作极性判断, 然后再令模拟开关S把与 V_x 极性相反的参考电压 V_{ref} 与积分器相连, 电容器 C 开始以恒定电流 V_{ref}/R 放电. 与此同时, 计数器开始计数, 电容器 C 上的电荷

从 Q_c(电压 V_c)开始线性地减小,当电容器 C 上的电压降为零时,由零值比较器给控制电路一个信号,令计数器停止计数,所以测量阶段所经历的时间 T_2 应满足以下关系:

$$-\frac{T_1}{RC}V_x+\frac{1}{C}\int_0^{T_2}\frac{V_{ref}}{R}\cdot dt=0,\quad 则\ T_2=\frac{T_1}{V_{ref}}V_x \qquad (A-16-2)$$

其中 T_1、V_{ref}在测量过程中均为常数,故 T_2 与 V_x 成正比,如果时钟脉冲的周期为 T_{cp},$T_1=N_1T_{cp}$,$T_2=N_2T_{cp}$. 则式(A-16-2)可改写为

$$N_2=\frac{N_1}{V_{ref}}V_x \qquad (A-16-3)$$

这表明:在测量阶段的计数值 N_2 与被测电压 V_x 成正比.

双斜式单片模数转换器在控制电路作用下,就按以上三个步骤周期性地对被测电压 V_x 进行模数转换. 在3位半模数转换器中,N_1 定为1 000,N_2 的计数范围为1~2 000,每个测量周期为4 000个 T_{cp}时间. 在每个测量周期内,除第二阶段取样时间总保持1 000个 T_{cp}时间不变外,其余两个阶段的持续时间是与被测电压 V_x 有关,但它们的总和应等于3 000个 T_{cp}. 由于满量程时 $N_2=N_{2max}=2\ 000$,$V_x=V_m=2V_{ref}$,若取 $V_{ref}=100$ mV,则被测电压的最大值为200 mV. 这就是一般数字万用表电压挡的基本量程.

2. 7107模数转换器引脚功能、外部元件的作用及参数选择原则

7107单片模数转换器为40脚双排结构,每个引脚的功能及与外部元件的连接如图A-16-2所示. 其中,R_{INT}与 C_{INT}就相当于图A-16-1积分电路中的 R 与 C,27脚是积分电路的输出端. 在测量过程中用示波器观察此引脚的电压 V_{INT}波形可以明了前面所述的电容器 C 的充放电物理过程. 模数转换过程所需的时钟脉冲发生器由7107内部的两个反相器(非门)F_1、F_2 以及与38、39和40脚相连的外部元件 R_1、C_1 组成,它属于两级反相的阻容振荡器,输出波形是占空比为50%的方波[电路见图A-16-2(c)]. 振荡频率 f_0 可根据 R_1、C_1 的值按下式估算:

$$f_0=\frac{1}{2.2R_1\cdot C_1}=0.455/R_1\cdot C_1 \qquad (A-16-4)$$

在7107单片模数转换器中,对由以上阻容振荡器提供的时钟脉冲,还要经过4分频之后再作为计数脉冲,该计数脉冲的周期才是我前面所说的 T_{cp}. 由前面所论述的基本原理可知,R_1、C_1 参数的差异并不影响最终测量结果,只是影响测量速率. 但是,为了提高测量过程中抗50 Hz工频干扰的能力,应把它们的参数选择得使:$T_1=n\cdot 20$ ms,其中 $n=1,2,3,\cdots$. 若取 $n=5$,则要求双斜式A/D转换器的取样时间 $T_1=1\ 000T_{cp}=1\ 000\times 4/f_0=0.1$ s,也即要求 $f_0=40$ kHz. 在 $C_1=100$ pF时,电阻 R_1 的取值满足以下关系:$R_1=0.455/40\times 10^3\times 100\times 10^{-12}=$

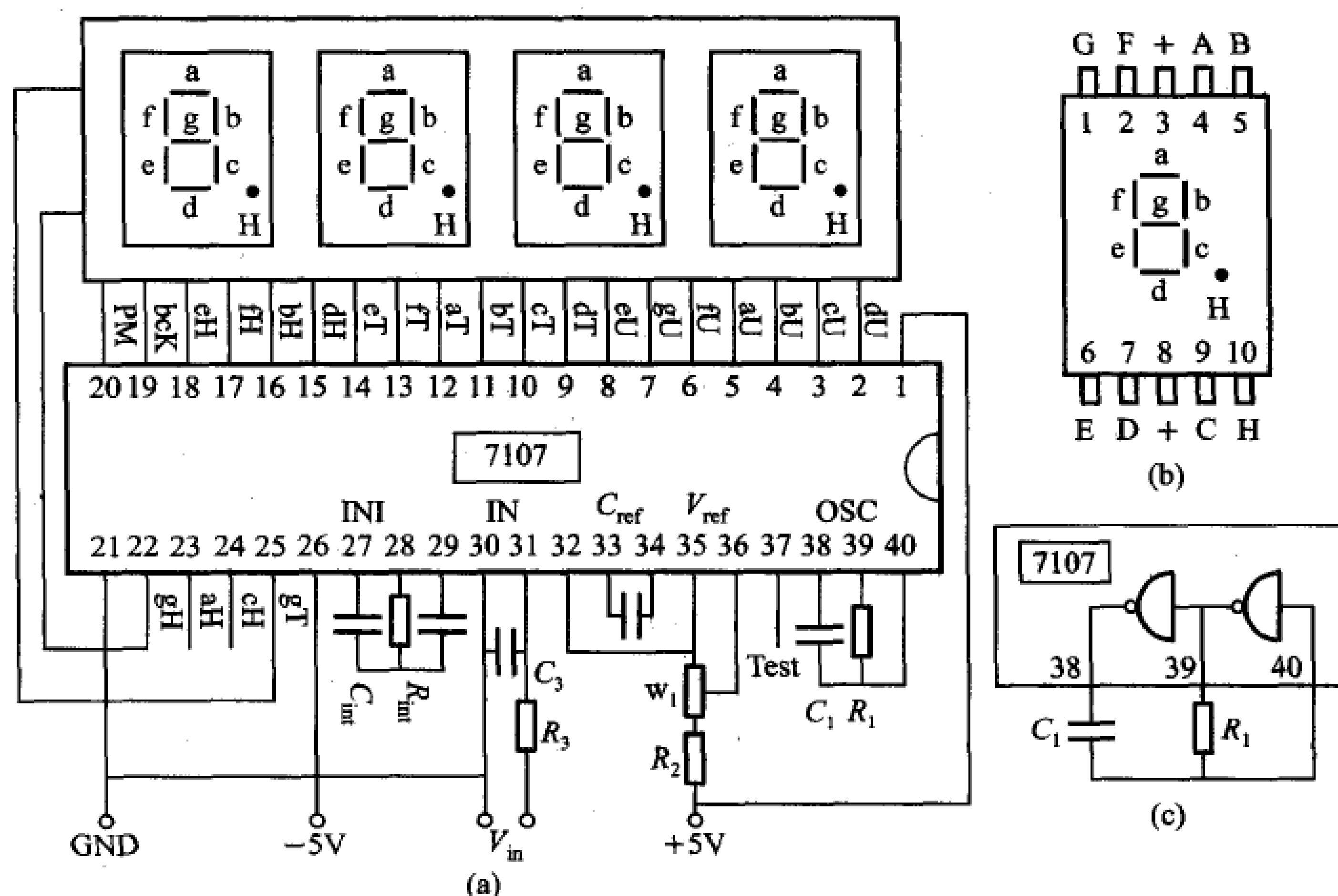


图 A－16－2 7107 引脚功能及与外部元件的连接

112.5 kΩ. 为了使 7107 芯片内部由运放电路组成的电容器 C 的充放电电路工作在线性区域，电容器 C 的充电电流不宜过大，通常限制为 4 μA. 在满量程为 200 mV 的情况下，积分电阻 R_{int} 的取值应为：R_{int} = 200 mV/4 μA = 50 kΩ，实际取电阻元件系列值 47 kΩ. 若参考电压 V_{ref} = 1 V，则满量程为 2 V，此时 R_{int} 应取 470 kΩ. C_{int} 的取值以积分电路输出电压变化在线性范围内，并不要超过 2 V 为原则. 在 $T_1 = 4\,000/f_0 = 0.1$ s 和充电电流为 4 μA 的情况下，为了使恒流充电电路的输出不超过 2 V，则 C_{int} 应满足以下关系：

$C_{int} = Q_{0max}/V_{0max} = T_1 \times 4\ \mu A/2\ V = 0.1 \times 4 \times 10^{-6}\ C/2\ V = 0.2\ \mu F$，实际取电容元件的系列值 0.22 μF.

在 7107 内部，计数器是由四位二－十进制计数单元串接而成，每位计数单元的输出线有四条，它们的二进制代码只能在 0000B ~ 1001B 范围内变化，这对应着十进制数 0 ~ 9 变化范围. 每位计数单元的输出线再经译码器译码后与七段 LED 数码显示管连接，最后以十进制数显示测量结果. 因此每位七段译码器有七条（加小数点显示控制线，共有八条）输出线，在 3 位半模数转换芯片中，共有 24 条线与外部的 LED 数码显示管相连. 对于 7107 芯片，这 24 条线的引脚编号及与 LED 的连接关系如用图 A－16－2(a) 和图 A－16－2(b) 所示.

3. 数字电表在非电量数字仪表设计中的应用技术

在非电量的电测技术中，需要利用传感器把非电量转换成电量，然后再用数字电表进行显示. 多数情况下，在非电量 x 的某一变化范围内传感器输出端的电压 V_s 与被转换的非电量 x 之间存在如下的线性关系：

$$V_s = a + k \cdot x \tag{A-16-5}$$

其中，a 代表非电量的数值 $x=0$ 时传感器的输出电压，k 称传感器的灵敏度系数，它表示 x 发生一个单位值的变化时，传感器输出电压所对应的变化量. 为了使接在传感器后的数字电表显示的读数与被测的非电量 x 的数值大小一致，首先需要用一个补偿电压 V_b 把式（A-16-5）中常数 a 所代表的传感器在 $x=0$ 时的输出电压抵消掉. 为此，把传感器的输出端接 7107 的 V_{in+} 脚，传感器的模拟地端接 7107 的 COM 端，而 7107 的 V_{in-} 脚应与 COM 端断开，并接补偿电压的正极性端，补偿电压的负极性端与 7107 的 COM 端连接，如图 A-16-3(a) 所示［如果传感器灵敏度系数 k 具有负值，应把 7107 的 V_{in+} 和 V_{in-} 的对外连接进行交换，如图 A-16-3(b) 所示］. 在此连接情况下，7107 的输入电压 $V_{in} = V_s - V_b = kx$. 在式（A-16-5）中若系数 $k \neq 1$，如果在式（A-16-3）中，仍然取 $V_{ref} = 100$ mV，则接至 7107 的 2—25 脚显示器显示的数字 $N_2 = kx$ 仍与被测非电量的数值 x 不等. 为了使图 A-16-2 中 LED 显示器显示的数字 N_2 与 x 一致，根据式（A-16-3）应把参考电压 V_{ref} 从 100 mV 改变成为 100 mV 的 k 倍.

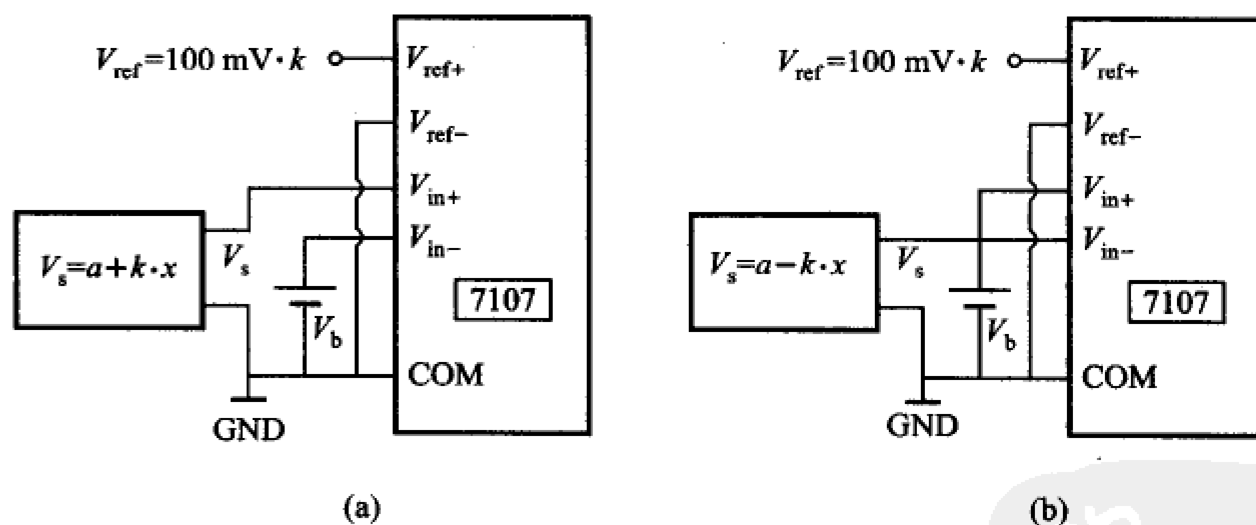


图 A-16-3 数字电表在传感器设计中的改装

注意，当参考电压 V_{ref} 升高为正常使用状态下 100 mV 的 k 倍时，根据式（A-16-3），7107 输入电压 V_{in} 的变化范围可以是 $0 \sim k \cdot 200$ mV 范围内. 此时，若 7107 外部元件积分电阻 R_{INT} 的阻值仍保持不变，当 7107 输入电压 V_{in} 接近这一测量范围的高端时，7107 模数转换过程中采样阶段积分电容的充电电流很大（尤其是传感器灵敏度系数的值很大的情况下），所以在采样阶段未结束时积分器的输出电压就会进入运放电路的饱和区，此时式（A-16-3）所表示的关系不

成立. 为了避免这一情况的出现,在需要增大 V_{ref}的使用条件下,外部元件积分电阻 R_{INT}的阻值也应相应增加.

实验内容

1. 数字电表的工作原理及在电测技术中的应用

(1) 7107 时钟频率的调节与测定

如图 A－16－4 所示,把示波器按实线所示接至 7107 的 38 脚(仪器面板上的"CLC"插孔),观测 7107 振荡器输出的波形,调节 R_1 电位器使时钟信号的周期 $T_0=25\ \mu s$.

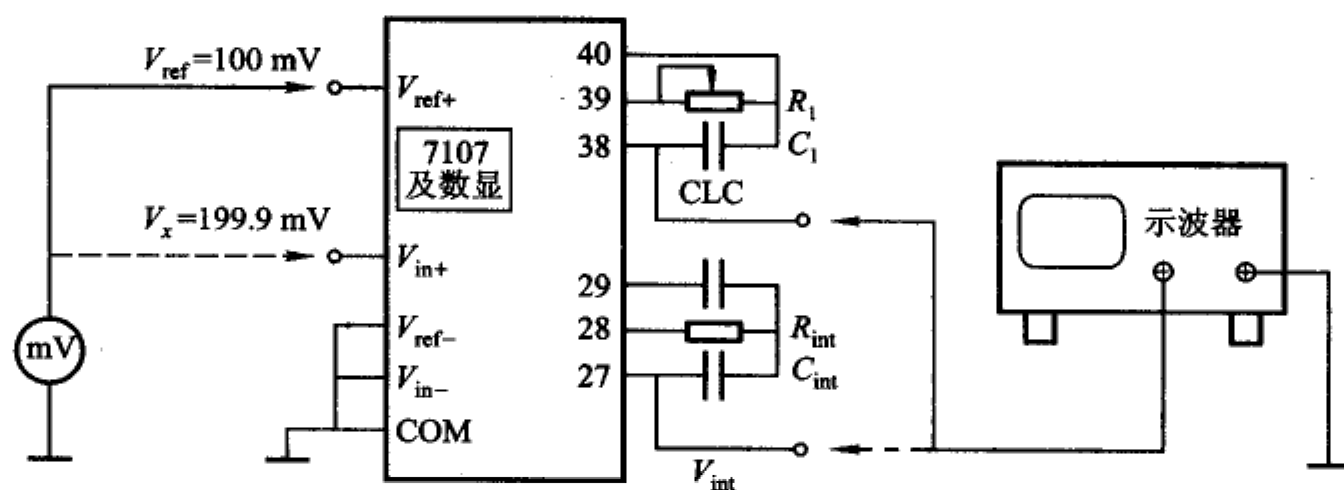


图 A－16－4　7107 时钟频率的调节与测定

(2) 正向积分时间 T_1 的测定

如图 A－16－4 所示,把 V_{ref}和 V_x 分别调节为 100 mV 和 199.9 mV. 示波器按虚线所示接至 7107 的 27 脚(仪器面板上的"V_{int}"插孔),观察 7107 积分电路输出波形. 调节示波器同步,当波形稳定时,记下正向积分时间 T_1 和积分电路在 T_1 期间的最大输出电压 $V_{int,max}$值.

(3) 反向积分时间 T_2 的测定

在 $V_{ref}=100$ mV 的情况下,按表 A－16－1 所列出的不同 V_x 值,用示波器观测各种被测电压 V_x 时 T_1、$V_{int,max}$和反向积分时间 T_2 值,并记下被试 7107 数字表头显示的读数.

表 A－16－1　V_x 为不同值时 T_1、T_2 和 $V_{int,max}$的测定

V_x/mV	T_1/μs	$V_{int,max}$/mV	T_2/μs	表头读数
50				
100				

续表

V_x/mV	T_1/μs	$V_{int,max}$/mV	T_2/μs	表头读数
150				
200				
测试条件:	$V_{ref}=100$ mV			

(4) 改变时钟信号的频率,重复第3项实验内容

根据以上测量结果,小结双斜式模数转换器的工作原理和特点.

2. 数字电表在电测技术中的改装

(1) 0~2 V 直流电压表改装

(a) 分压法　电路接线如图 A-16-5(a)所示.

(b) 提高参考电压法　0~2 V 的测量范围,也可采用提高参考电压并相应改变 R_{int}阻值的方法($V_{ref}=1$ V,$R_{int}=470$ kΩ).电路接线如图 A-16-5(b)所示.

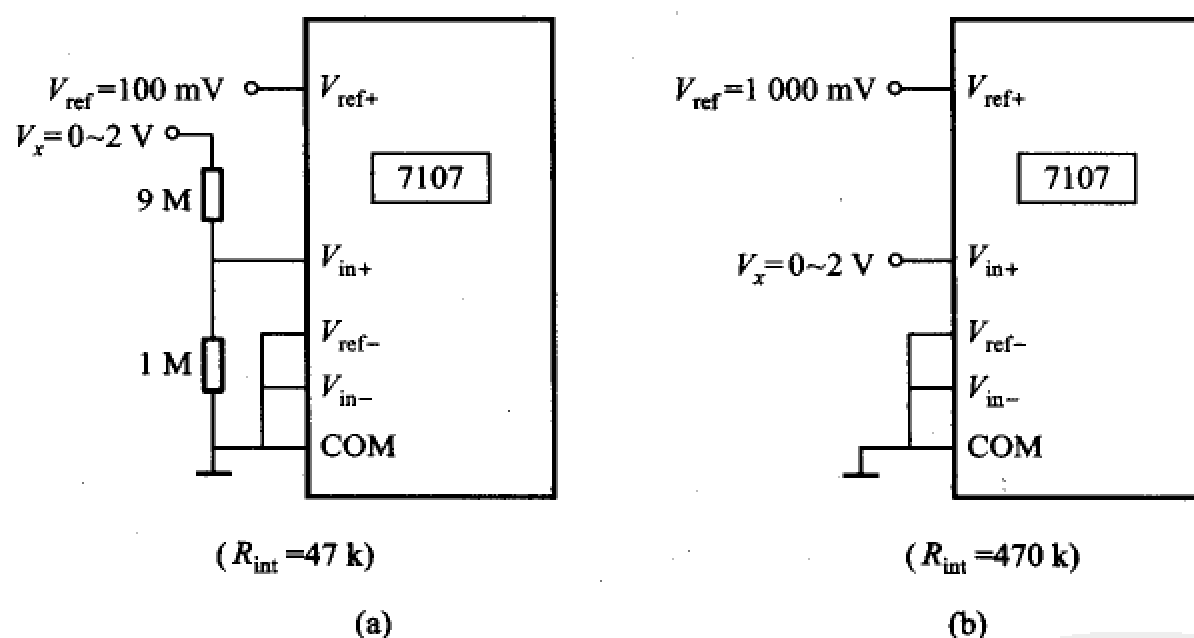


图 A-16-5　0~2 V 直流电压表改装

(2) 直流电流表的改装

(a) 欧姆压降法　电路接线如图 A-16-6(a)所示,让被测电流流过阻值一定的电阻 R_i,然后用测量范围为 0~200 mV 的数字电压表,测量该电阻上的欧姆压降,为了使读数与被测电流一致,电流表量程与 R_i 阻值的乘积应为 200 mV.这种方式组成的电流表在满量程时,电流表两端有 200 mV 的压降,这对被测电路原有工作状态有一定影响.

(b) 由运放电路组成的 $I-V$ 变换法　电路接线如图 A-16-6(b)所示,适

合于小电流的测量，其特点是这种电流表接入被测电路后在电路上的压降为零，所以对被测电路原有的工作状态没有任何影响.

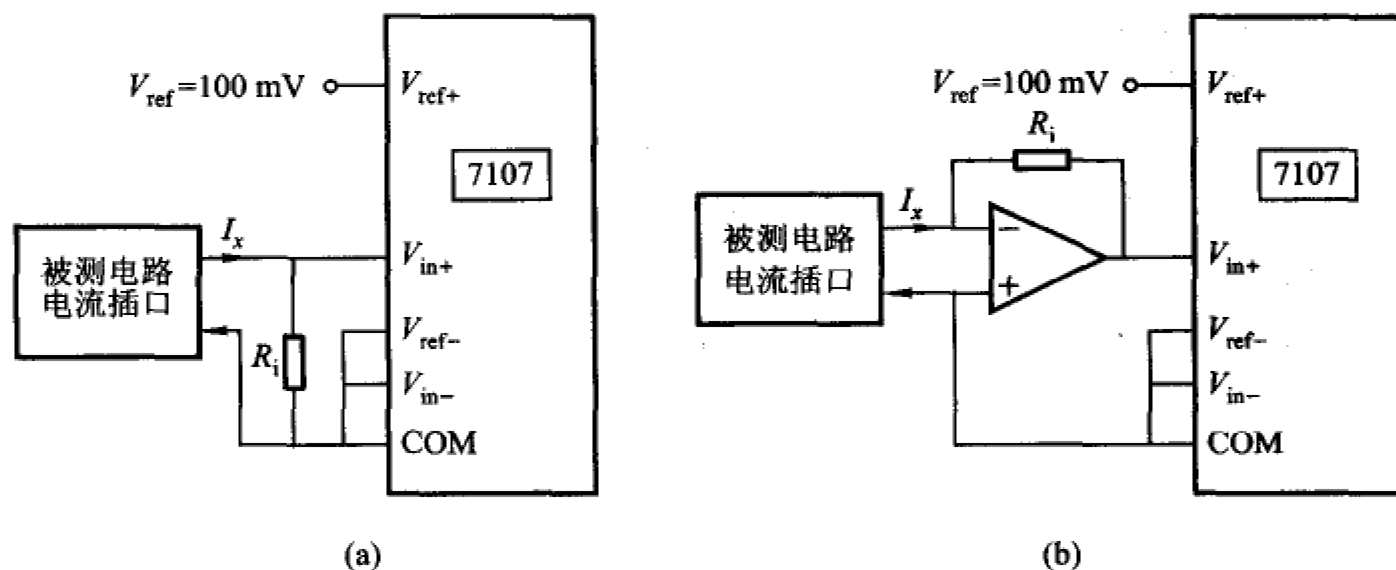


图 A－16－6　直流电流表的改装

（3）欧姆表的改装

电路连线如图 A－16－7 所示，在此情况下，$V_x = IR_x$，$V_{ref} = IR_s$，

∵　　$V_x = (N_2/N_1) \cdot V_{ref}$

∴　　$R_x = (N_2/N_1) \cdot R_s$

当 $R_s = 1\ \text{k}\Omega$ 时，R_x 的测量范围为 0～2 kΩ，$R_s = 10\ \text{k}\Omega$ 时，R_x 的测量范围为 0～20 kΩ……

图中的 R 是为了在各种情况下使接至 V_{in+} 的电压不超过 200 mV（当 $R_{int} = 47\ \text{k}\Omega$ 时）而设置的可调电阻.

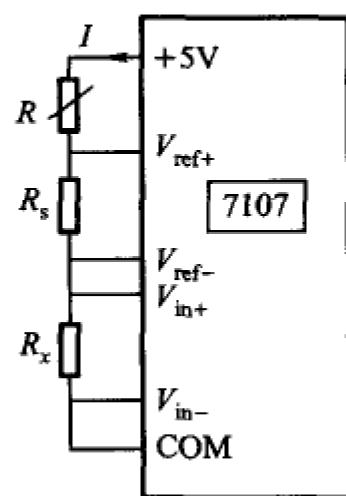


图 A－16－7

3. 数字电表在传感器设计中的应用技术（以 PN 结为热探头的温度传感器的设计为例）

（1）PN 结温度传感特性的测定

PN 结在恒流状态下，随着温度的升高结电压线性下降，故其温度传感特性的数学表达式可写成

$$V_s = a - K_0 \cdot t \qquad (A-16-6)$$

按图 A－16－8 所示的电路，可以测得 PN 结在恒流状态下结电压随温度变化的曲线，测量时被测 PN 结与测温范围为 0～100 ℃ 的水银温度计沉浸在盛有变压器油的烧杯中，用磁力搅拌加热器加热变压器油至 100 ℃ 后，加热器断电，在变压器油冷却过程中用图中的电压表可测得

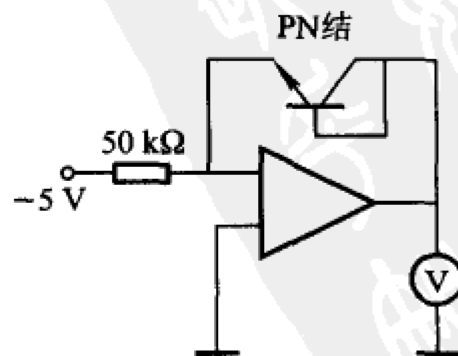


图 A－16－8

PN 结在 100 μA 恒流状态下结电压随温度变化的特性曲线，根据实验数据，用线性拟合方法求出温度传感特性式(A-16-6)中的 a 和 K_0 值.

(2) 数字温度计的设计

要求：① 测温范围 0~100 ℃；

② 测温探头为温度传感特性已知的PN 结；

③ 根据 7107 电压表头的基本工作原理拟定电路结构及电路元件连线图，计算电路参数；

④ 组装数字温度计，并进行零点、满量程的调节.



B. 设计性实验

实验 B-1 液体密度的实时测量

在生产和科研中,经常需要对液体的密度进行实时的测量和控制.所谓实时测量,就是在生产流程进行的过程中,通过测试探头(常称传感器),采用接触或非接触的方式,把被测液体的密度转换成电信号,然后通过数据采集器实时地将采集到的电信号送给计算机进行数据处理,最后计算机将处理后的数据按照测量要求将其以图线等形式予以显示.不难看出,实时测量的优点在于能迅速地反映液体的密度大小,以便于进行反馈控制.例如,在石油钻探中,就需对钻井用的泥浆的密度进行实时的测量和控制,这对钻井的安全和成功至关重要.

实验设计要求

设计组装一套具有实时测量液体密度功能的实验装置.该装置应达到如下的基本技术指标:

量程:0.50~1.50 g/cm^3.

精度:在量程范围内,额定误差小于最大量程的1%.

灵敏度:0.01 g/cm^3.

显示:以图线形式显示测量结果并给出模拟定标的方法.

在进行项目设计时,要求呈现以下设计过程:分析测量原理,确定设计方案,测评技术指标,撰写研究报告.

实验设计内容

1. 测量原理和方法的选择

(1) 测量原理的提示

由阿基米德原理(如图 B-1-1 所示)可知,浸于液体中的浮子,其所受的浮力等于其所排开的同体积液体的重量,即

$$F_{浮} = Vg\rho$$

式中 V 为浮子的体积,ρ 为液体的密度.

此时,悬挂物体吊线的张力 F_T 为

$$F_T = mg - Vg\rho$$

上式表明,液体密度的变化将引起悬线中张力的变化.

(2) 测量方法的提示

根据 $\rho = \frac{mg - F_T}{Vg}$,如果测得浮子的重力 mg,悬线张力 F_T 和浮子的体积 V,即可得到液体的密度.

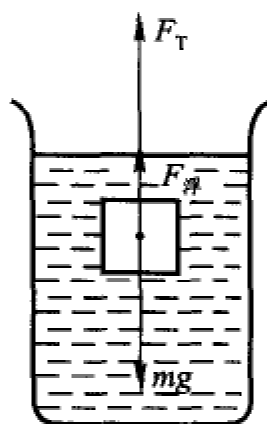


图 B-1-1

2. 总体方案的设计

要设计一套实时测试装置,首先要依据测量原理和测量方法,结合测量所要达到的基本技术指标合理构建实验方案.其中包括:测量仪器的选择、对主要测量仪器性能的检测、实验参数的采集、模拟定标等,在此基础上提出具有可操作性的实验操作步骤.

(1) 选择测量仪器的提示

就本课题而言,依据测量原理和测量方法,所涉及的实验仪器主要包括:测力器、浮子、被测液体、密度计等.其中测力器是关键部分,它的特性指标将对浮子等实验器材的选择起决定性的作用.

必须指出的是,在实际问题中,哪一测量仪器的特性对整个实验起到关键性的作用并不是唯一的和一成不变的,它需要根据所要解决的实际问题的具体要求和条件而定.例如,如果实际问题中装待测液体的容器较小,则浮子的几何尺寸就受到限制.因此,总体设计中可能需要由对浮子的设计来决定测力器等仪器的选择.

(2) 主要测量仪器性能检测的提示

(a) 测力器性能的测试

我们知道,一般而言表征测力器性能的主要指标有:量程、灵敏度及线性度等.为此,需要根据被选测力器的特征有针对性地对其相关性能进行检测.本实验提供的测力器为朗威 DISLab 数字信息化实验系统的力传感器,其量程为 $-20\ N \sim +20\ N$,最小分度值为 0.01 N.它需要和与之配套的数据采集器及其能对数据采集进行操控的软件系统一起使用.针对本传感器的特征,其线性度的测试建议采用静态测试法(测量一组砝码质量和测力器示数进行处理).另外还要采用测得的数据对测力器进行定标确定实际的量程和最小分度值.

(b) 浮子性能的测试

依据测量原理,悬吊于待测液体中的浮子是联系液体密度变化和力传感器变化的桥梁.因此,其尺寸、形状的设计与选择是否合理,将直接影响实验装置的

测量性能. 本实验提供的浮子是大小不等的密封的玻璃瓶,供设计选择. 为调节其重量,可采用在瓶内装入小铅丸的方法.

(3) 模拟定标的提示

依据测量原理,待测液体的密度与浮子的浮力变化有一一对应的函数关系,而浮子的浮力变化则是通过悬线张力的变化被测量出来的. 为此,要求在把握上述测量原理的基础上,提出具有可操作性的模拟定标方法.

3. 整机测定和调试

将建立在理性分析和性能检测基础的浮子、力传感器等实验装置组装成一个整体,在此基础上选择合适的途径和方法改变被测液体的密度,进行"实时测量液体密度"的模拟测试. 期间,应做好实验数据的采集和记录工作,以便分析、验证各项指标是否达到要求.

4. 写出研究测试报告

为使研究报告具有研究性的特征,建议整个实验方案的设计应具有比对性特征,即可以依据被选用的测量原理与方法,通过改变实验条件,比如说改变实验器材的类型或参数,对可能影响测量技术指标的研究方案作深入的比对探究,以此提升实验探究的内涵.

[附注]

朗威 DISLab 数字信息化实验系统使用说明:

本实验可选用朗威 DISLab 数字信息化实验系统. 实验中主要用到的系统部件有:力传感器、数据采集器、计算机以及系统软件等,图 B－1－2 是系统框图.

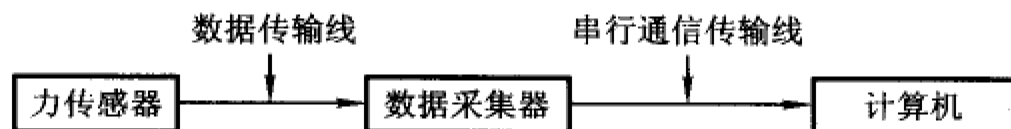


图 B－1－2　数字信息化实验系统框图

其中,力传感器的传感器件为应变计,它通过专用数据传输线与数据采集器连接. 数据采集器与计算机以串行方式通信.

朗威 DISLab 系统软件的安装与使用可参照公司提供的用户手册.

实验 B－2　用落棍法测量金属棍中纵波的传播速度

将长度 l 约为 1 m 的金属棍垂直落下,和桌上的厚金属板相撞后弹起(图 B－2－1),设下落的棍和金属板的接触时间为 t,则棍中纵波传播速度 v 为

$$v = \frac{2l}{t} \qquad (B-2-1)$$

要求:(1) 设计测量时间 t;

(2) 分析接触时间 t 为何等于 $2l/v$?

由于金属细棍中纵波传播速度 v 为

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad (B-2-2)$$

式中 E 为弹性模量,ρ 为密度. 在测出 v 之后,可由上式求出金属棍材料的 E 值.

提示:棍中的纵波为脉冲纵波.

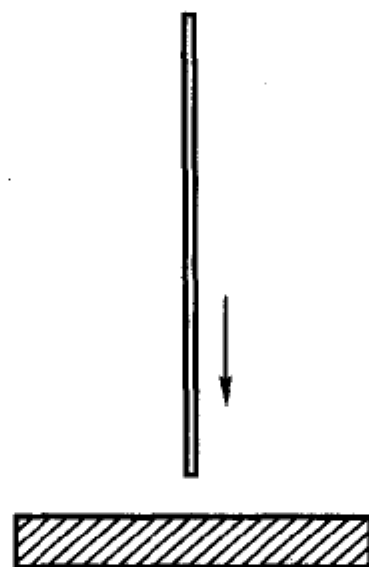


图 B-2-1

实验 B-3 倾斜槽中球的运动

在倾斜槽中运动的球,是滚动? 滑动? 或又滚又滑的运动? 此实验要求将理论分析和实际测量相结合,对此问题进行分析和判断.

图 B-3-1 为实验装置示意图,球从挡板处由静止开始运动,光电门 A、B 和数字毫秒计结合测量球通过 A、B 间的时间,用以测量球质心的加速度 a.

要求设计测量加速度 a 的公式和倾角 θ 的测量方法.

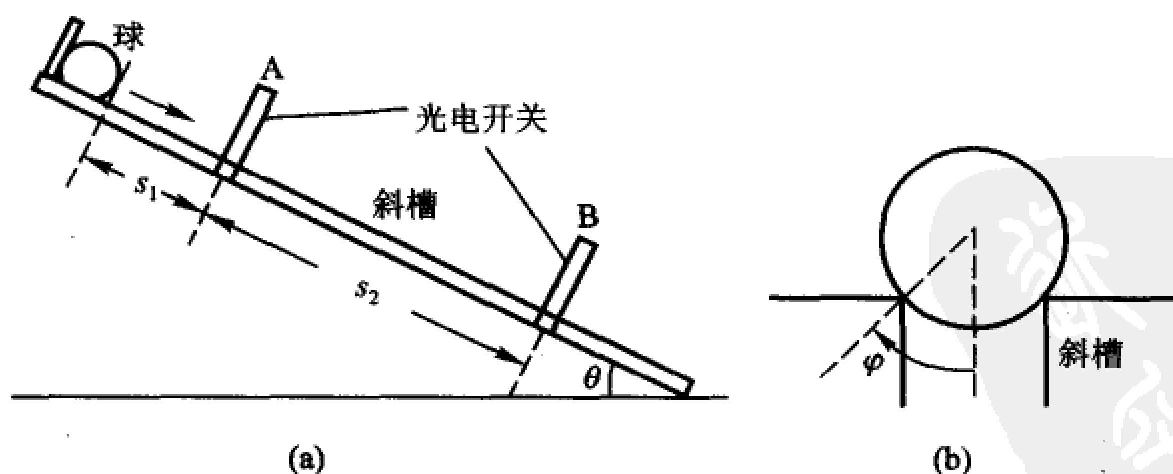


图 B-3-1

理论分析

理论分析要求给出如下假设条件下，在倾斜槽中球质心的加速度表达式：

（1）假设球是无滑动滚下的，其质心加速度 a_1 为

$$a_1 = f(\theta;\varphi)$$

式中 φ 为球心对倾斜槽的垂直方向与球对槽的正压力方向的夹角[图 B－3－1(b)].

（2）假设球是无滚动滑下的，球质心加速度 a_2 的表达式为

$$a_2 = f(\theta;\varphi,\mu)$$

式中 μ 为球与槽间的动摩擦因数.

要设计测量 a_1、a_2 表达式中有关参量的方法.

实际测量与分析

（1）测量槽在不同倾角 θ（大约从 5°到 55°）时，槽中球质心的加速度 a.

（2）测量 a_1、a_2 表达式中各参量的值.

（3）在同一坐标纸上作 3 条图线，即①$a-\theta$ 图线；②$a_1 = f(\theta;\varphi)$；③$a_2 = f(\theta;\varphi,\mu)$.

对比测量曲线和理论曲线，说明槽中球运动的变化规律.

实验 B－4 用共振法测细丝或薄片材料的弹性模量

此实验的要求有两部分：

（1）参照图 B－4－1 设计一使样品能和电信号发生共振的装置.

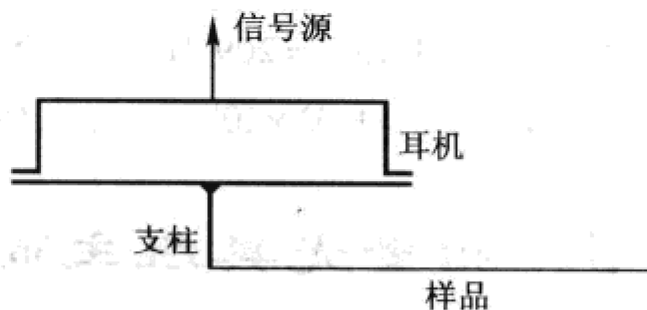


图 B－4－1

（2）求出一端固定，另一端为自由端时的容许频率（即产生共振的频率）.

参照本书实验 A－3 用共振法测弹性模量的实验，从式（A－3－13）出发求 $\frac{dX}{dx}$、$\frac{d^2X}{dx^2}$、$\frac{d^3X}{dx^3}$.

边界条件：对 $x=0$ 端，$X=0$，$\frac{dX}{dx}=0$，消去 K 可得

$$-C_2=C_4,\ -C_1=C_3$$

对 $x=l$ 端 $\frac{d^2X}{dx}=0$、$\frac{d^3X}{dx}=0$，结合 $x=0$ 的条件

$$C_3(\sin Kl+\sinh Kl)+C_4(\cos Kl+\cosh Kl)=0$$
$$C_3(\cos Kl+\cosh Kl)+C_4(\sinh Kl-\sin Kl)=0$$

消去 C_3、C_4，可得

$$\frac{\sin Kl+\sinh Kl}{\cos Kl+\cosh Kl}=\frac{\cos Kl+\cosh Kl}{\sinh Kl-\sin Kl}$$

乘开整理可得

$$\cos Kl\cdot\cosh Kl=-1$$

上式为一端固定，另一端为自由端的容许频率条件，用数值解法，求出满足上式的一系列 Kl 值，将 $\beta=Kl/\pi$ 代入式（A－3－20），可得容许频率值（基频和各谐频）.

输入不同频率的信号，测出基频与第一谐频，另外按式（A－3－20）测出其他相关量，求出样品的弹性模量.

用移测显微镜，测基频 ν_0 共振时的振幅 A_{max}，再测 ν_0+1 Hz 到 ν_0-1 Hz 范围内，10 个 ν 对应的振幅 A，作 $\nu-A$ 曲线.

（3）用另一段同样材料，同样尺寸的金属丝重复上述实验，但后一材料内部有损伤（例如扭曲）.

比较二者的差异.

实验例：铜丝，直径 0.184 mm，线密度 $\rho=0.002\ 30$ g/cm，长度 5.15 cm，实测频率为

$$\nu_0(\text{基频})=34.7\ \text{Hz},\nu_1=209\ \text{Hz},\nu_2=586\ \text{Hz}$$

得弹性模量 $E_1=1.11\times10^{11}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$，$E_2=1.02\times10^{11}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$，$E_3=1.02\times10^{11}\ \text{N}\cdot\text{m}^{-2}$

实验 B－5　测量光具组主面的位置

将二凸透镜（像方焦距分别为 f'_1 和 f'_2）相距为 d 放置，组成一光具组，测量光具组的物和像的位置及大小，放大率为 +1 的位置即为主面的位置，据此设计

测量方案．光具组的安排有以下两种要求：

(1) $d>f'_1+f'_2$；

(2) $d<f'_1, d<f'_2$.

写出分析和测量的过程及结果．

提示：主面可能在光具组中间，也可能在光具组的外侧．

实验 B－6 音叉声场的研究

用橡胶锤敲一下音叉，声波将向空间的各方向转播形成声场．

现在将音叉固定在一回转台上，在附近安置一麦克风为接收器．麦克风将接收的声波转换为电信号，经放大后的信号送入示波器显示（图 B－6－1）．

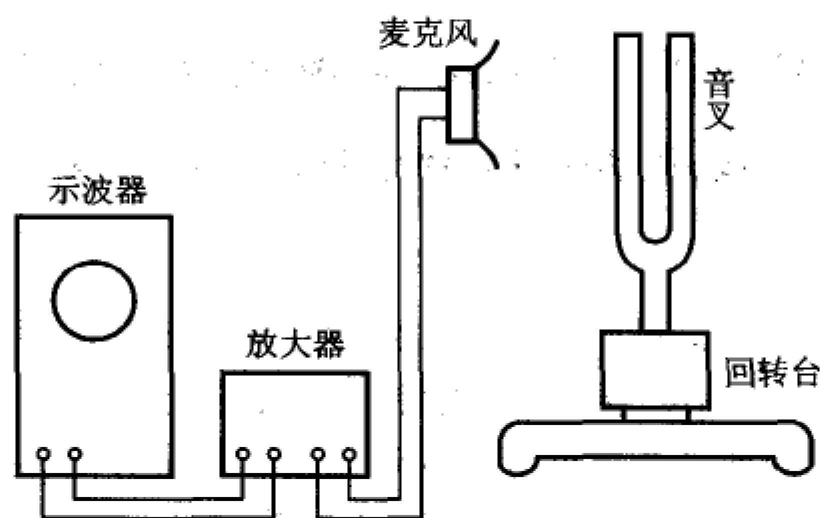


图 B－6－1

打击音叉后转动音叉，可听到声音的强弱的变化，从示波器上也可看到信号的强度有变化．

对此现象曾有两种不同的设想：

(1) 是声波的干涉现象；

(2) 是音叉能量辐射的方向性问题．

现在假设音叉声场的强度变化是声波干涉的结果，要求仔细对此实验进行探索检验，说明检验的结果是肯定假设？还是否定假设？

提示：

(1) 结合理论分析，指出假设成立时应有的现象．

(2) 麦克风要用灵敏度高的，最好用两个麦克风结合双踪示波器在互相垂直的方向去观测．

实验 B-7 电容及介电常量的测量

每种电介质都有固定的介电常量,因此,对于给定的电介质(绝缘体)类型,电容的大小与电容器极板的表面积成正比,与电介质的厚度成反比. 电介质的厚度也决定了电容器的电压承受能力(额定电压).

任务与要求:

(1) 测量电容

要求:阐明测量原理,设计测量电路,拟定测量步骤,测出待测电容值.

(2) 测量一圆形薄片电介质介电常量

要求:阐明测量原理,设计测量电路,拟定测量步骤,测出介电常量.

实验 B-8 热敏电阻的特性测试和温度的实时测量与控制

温度的测量和控制是科研和生产实践中经常遇到和需要解决的问题. 如何根据温度测量范围、精确度、灵敏度、对测温用敏感元件反应速度的要求以及测温的环境条件来合理地选择温度测量的传感器和测量方法,是解决问题的关键. 本课题要求设计一个测量装置,使它具有小的热惯性、高的灵敏度,并具实时显示和高限报警功能. 内容涉及温度的测量知识,传感器特性的测试、定标,基本电学量的测量,非平衡电桥等方面的基本知识的运用,也是一种初步的综合应用能力的培养.

设计研究要求

设计一套用于温度的实时测量和控制的装置,要求达到如下的技术指标:

温度的测量范围: 10 ~ 60 ℃.

精确度: 1.50 ℃.

灵敏度: 0.20 ℃.

响应速度: <5 s.

并设置高限 60 ℃ 报警装置.

显示: 用适当的数字万用表作显示装置.

要求写出测试研究总结报告,以测试数据和实时测量记录说明所设计的装置满足所提技术指标. 并提交完整的装置技术资料.

原理和方法提示

1．测温传感器的选择

由于本测温装置要求实时地显示温度测量值，因而选择能把温度的变化转化为电学量输出的传感器较为合适．电阻温度传感器及温差电偶温度传感器均具有以上功能，但在技术指标中，对测温灵敏度及响应速度均提出了具体的要求，从这方面的要求考虑，所选择的传感器体积要小，温度变化 0.2 ℃时，输出显示应能分辨，根据以上要求，比较合适的是珠状热敏电阻及新型的集成温度传感器 AD－590.

2．热敏电阻的阻值随温度变化的特性及线性化问题

半导体热敏电阻具有很高的负电阻温度系数，其灵敏度（每度温度变化所相应的电阻变化率）要比电阻丝式热敏电阻高很多，而且体积可以做得很小．热敏电阻的电阻随温度的变化，可用如下的指数关系表示，即

$$R_t(T)=R_{20}^{b\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{20}}\right)} \qquad (B-8-1)$$

式中 $R_t(T)$ 系摄氏温度为 t（热力学温度为 T）时的电阻值；R_{20} 系温度为 20 ℃时的电阻值；T 为热力学温度；T_{20} 为 $t=20$ ℃时的热力学温度；b 为与半导体材料物理性能有关的常量．

由式（B－8－1）可知，半导体热敏电阻的电阻值随温度变化的关系是非线性的，如果我们通过放大线路，把电阻的变化转化为电压的变化，并且放大线路是线性放大线路，则由于热敏电阻阻值随温度的非线性变化关系，必然导致输出电压随温度变化是非线性的关系．因此，在测温中，为了使输出电压随温度作线性的变化（因为这样便于显示和读数），就必须采用某种线性化网络，经过线性化网络校正，使输出电压随温度的变化基本上成为线性关系．

使热敏电阻线性化的方法很多，最简单的方法是用温度系数很小的电阻与热敏电阻串联或并联，可以使等效电阻与温度的关系在一定的范围内是线性的．

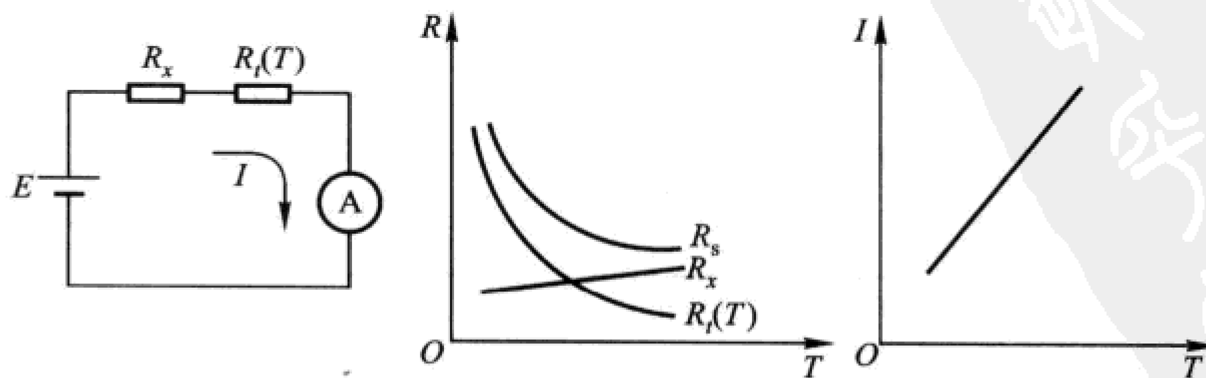


图 B－8－1　串联补偿电路

图 B－8－1 是热敏电阻 $R_t(T)$ 与补偿电阻 R_x 串联的情况，串联后的等效电阻为 $R_s=R_x+R_t(T)$. 由于 $R_t(T)$ 随着温度上升而下降，而补偿电阻是金属或合金材料电阻，具有一小的正温度系数，只要选择合适的 R_x，R_s-T 曲线在某温度范围内近似为双曲线，即温度与电阻的倒数成线性关系，即 $T\propto\frac{1}{R_s}$. 如果利用恒压源构成测量电路，则电流随温度作线性变化.

此外，还可使用并联补偿法. 在热敏电阻 $R_t(T)$ 的两端串并联电阻 R_1 和 R_2，如图 B－8－2 所示，则总电阻 R_s 是温度的函数，即

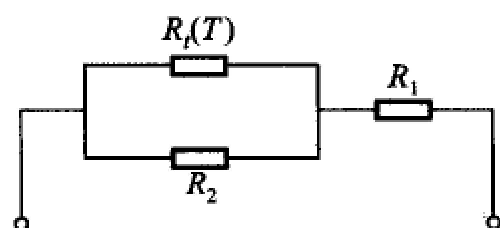


图 B－8－2

$$R_s(T)=\frac{R_t(T)\cdot R_2}{R_2+R_t(T)}+R_1 \quad (B-8-2)$$

若电阻 R_1 和 R_2 不和热敏电阻安装在一起，即保持其和室温相同的温度，则可把 $R_s(T)$ 在某温度 T_0 处进行级数展开，令展开式的二次项系数等于零，忽略高次项，$R_s(T)$ 即成为温度的线性函数. 而展开温度 T_0 常取测温区间的中间温度，在使展开式的二次项系数等于零时，可求得 R_1、R_2 的合适值. 具体计算要编写程序进行计算，参阅本实验后的[附注].

用热敏电阻作传感器测温时，另一个需要注意的是工作电流的选择问题. 即热敏电阻的电阻变化纯粹由环境温度的变化所引起，通过热敏电阻的工作电流应十分微小，不足以对热敏电阻本身加热. 如果热敏电阻的工作电流过大，则即使环境温度不变，也会因电流自身的热效应而使热敏电阻的阻值变化，这样就无法测温. 工作电流的大小，可以从热敏电阻的伏安特性测量中确定. 即在一定的环境温度下，热敏电阻的阻值应是一个定值，其伏安特性是一条直线. 如图 B－8－3 所示，该图表明，当热敏电阻作测温用时，其工作电流 I 应小于 10^{-5}A.

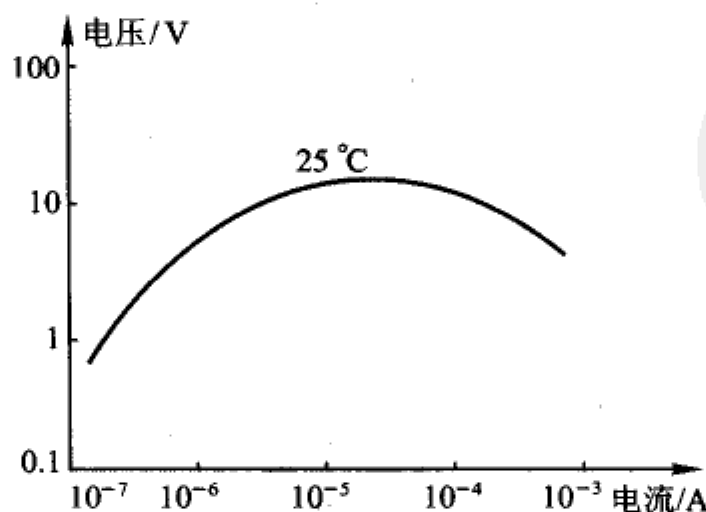


图 B－8－3

3．AD590 集成温度传感器特性介绍

AD590 为新发展的半导体集成温度传感器，其温度测量灵敏度高且线性好，测量中又不需要设置恒定的温度参考点，因而，在测温应用中受到广泛的欢迎．AD590 测温原理十分简单，它是一个电流型的集成温度传感器，温度每变化 1 ℃，将引起 1 μA 的电流变化，即满足 1 μA/℃的灵敏度．如果串接 5 kΩ 的取样电阻，接成如图 B－8－4 所示的线路，则温度每 1 ℃的变化，将在取样电阻上产生 5 mV 的电压变化．因此，接数字电压表，就可很方便地进行温度的测量和显示．如果数字电压表可测到 0.01 mV，则 AD590 所能达到的测温灵敏度就达 2×10^{-3}℃的量级．

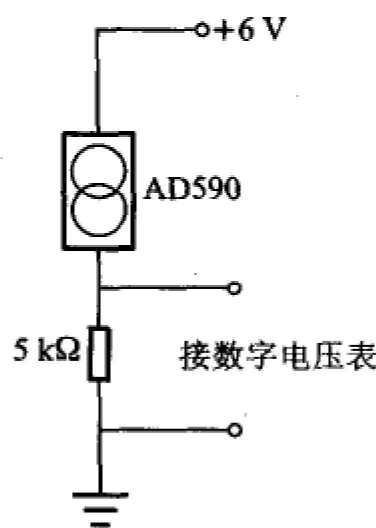


图 B－8－4

仪器和用具

珠状热敏电阻①、AD590 集成温度传感器②、$3\frac{1}{2}$数字电压表 2 只、精密金属膜电阻若干、精密稳压电源、恒温水浴③、标准电阻（10Ω，100Ω）、惠斯通电桥、测量放大器、0～100 ℃分度值为 0.1 ℃的标准水银温度计．

实验内容

1．热敏电阻的标定

测定热敏电阻阻值随温度变化的特性曲线．要求定出所用热敏电阻的电阻值随温度变化的经验公式，即确定式（B－8－1）中的 R_{20} 和 b．

2．计算线性化网络，定出 R_1、R_2，并从理论上计算线性化后，电阻 $R_s(T)$ 和温度之间的相应变化关系，求相关系数．希望用不同的参数 C 进行多次计算（参阅本实验后的[附注]），求得最佳的 R_1 和 R_2．能否进一步提高线性度？T_0 取怎样的温度合适？如有可能，编写计算程序．

3．对计算出的线性化网络进行定标测试，求得实验中的 $R_s(T)$ 和 T 之间的相关系数，在测温区间内，该相关系数达到 0.999．

① 上海无线电一厂生产．

② 上海半导体器件十六厂生产．

③ 可参阅上海实验仪器厂为其产品编写的《超级恒温器 501 型使用说明书》．

4. 放大线路的安装和调试

参阅参考文献[2],选择合适的电路进行装配调试,使输出电压对应的温度和实际温度之间的差在量程范围内满足技术指标的要求. 也可选用所提供的测量放大器进行信号的放大和测量.

5. 选择合适的线路,利用组装的热敏电阻安装一温控装置.

6. 设计用 AD590 作为测温传感器的测量线路,并进行安装和定标测量.

7. 写出测试总结报告.

[附注]

[1] 热敏电阻线性化网络补偿电阻 R_1、R_2 的计算公式推导:

$$R_s(T)=\frac{R_t(T)R_2}{R_t(T)+R_2}+R_1$$

$$\frac{R_s(T)}{R_1}=1+\frac{\frac{R_t(T)}{R_1}\cdot\frac{R_2}{R_1}}{\frac{R_2}{R_1}+\frac{R_t(T)}{R_1}} \tag{B-8-3}$$

令

$$\left.\begin{aligned}A&=\frac{R_t(T)}{R_{20}}=e^{b\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{20}}\right)}\\B&=\frac{R_{20}}{R_1}\\C&=\frac{R_2}{R_1}\\A\cdot B&=\frac{R_t(T)}{R_{20}}\cdot\frac{R_{20}}{R_1}=\frac{R_t(T)}{R_1}\end{aligned}\right\} \tag{B-8-4}$$

把式(B-8-4)代入式(B-8-3),得

$$\begin{aligned}\frac{R_s(T)}{R_1}&=1+\frac{A\cdot B\cdot C}{A\cdot B+C}\\&=1+\frac{e^{b\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{20}}\right)}\cdot B\cdot C\cdot R_1}{R_{20}e^{b\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{20}}\right)}+R_1C}\end{aligned} \tag{B-8-5}$$

设用 $f(T)$ 表示 $\frac{R_s(T)}{R_1}$,并把 $f(T)$ 在 T_0 处进行级数展开,则得

$$f(T)=f(T_0)+\frac{f'(T_0)}{1!}(T-T_0)+\frac{f''(T_0)}{2!}(T-T_0)^2+\frac{f'''(T_0)}{3!}(T-T_0)^3+\cdots+R_n \tag{B-8-6}$$

为了使$f(T)$是温度的线性函数,忽略高次项,并使其二次项的系数,即$f''(T)=0$.

现求$f(T)$的一阶和二阶导数:

$$f'(T_0)=\left[\frac{R_s(T)}{R_1}\right]'=\left[1+\frac{ABC}{AB+C}\right]'$$

$$=\frac{BC^2A'}{(AB+C)^2} \qquad (B-8-7)$$

求导时注意B、C为常数项,只要对A求导即可,

$$f''(T_0)=\left[\frac{BC^2A'}{(AB+C)^2}\right]'$$

$$=B'C^2\left[\frac{(AB+C)A''-2B(A')^2}{(AB+C)^2}\right] \qquad (B-8-8)$$

$$\because\ A=\frac{R_t(T)}{R_{20}}=e^{b\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{20}}\right)} \qquad (B-8-9)$$

$$\therefore\ A'=-\frac{b}{T^2}A \qquad (B-8-10)$$

$$A''=\frac{b}{T^4}(b+2T)A \qquad (B-8-11)$$

把式(B-8-9)至式(B-8-11)代入式(B-8-8)并令其等于零,可解得

$$C=A(T_0)\cdot B\cdot\left(\frac{2b}{b+2T_0}-1\right) \qquad (B-8-12)$$

上式中$A(T_0)\left(\frac{2b}{b+2T_0}-1\right)$对一定的热敏电阻展开的中间温度$T_0$确定后,其值是已知的,而$C$是补偿电阻$R_2$和$R_1$的比值,可以取其比值$R_2/R_1$为适当值,则由上式即可定出$B$的值,根据$B=R_{20}/R_1$定出$R_1$的值,然后乘以$C$即可得$R_2$的值. 在实际计算网络电阻时,可适当调整$C$的取值,求得最恰当的串并联电阻$R_1$和$R_2$.

[2] 关于 AD590

1. 性能指标

(1) AD590 的测温范围为 -55 ~ +150 ℃.

(2) AD590 的电源电压范围为 4 ~ 30 V. AD590 可以承受 44 V 正向电压和 20 V 反向电压,因此器件反接也不会被损坏.

(3) 输出电阻为 710 MΩ.

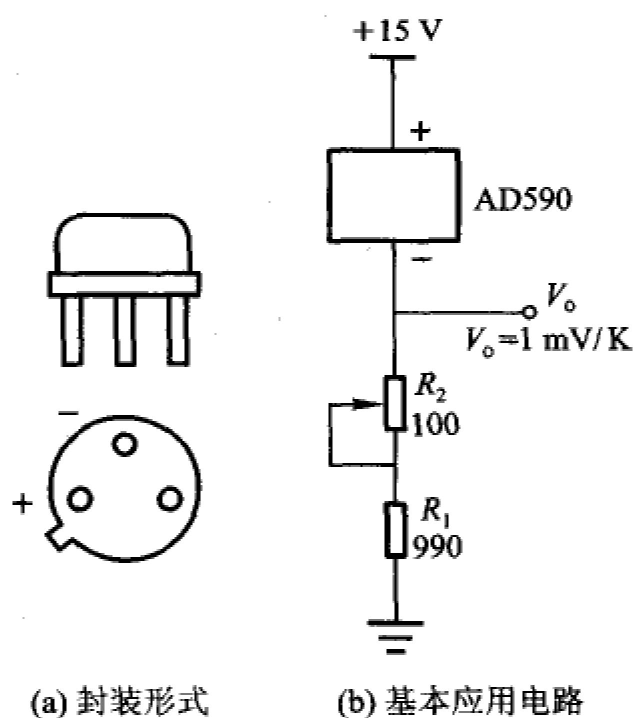
(4) 精度较高,AD590 共有 I、J、K、L、M 五挡,其中 M 挡精度最高,在 -55 ~ +150 ℃范围内,非线性误差为 ±0.3 ℃.

(5) AD590 输出为电流变化,温度变化 1 ℃,引起 1 μA 的电流变化.

2. AD590 的应用参考电路

(1) 基本应用电路

图 B－8－5(a) 是 AD590 的封装形式,图 B－8－5(b)是 AD590 用于测量热力学温度的基本应用电路. 因为流过 AD590 的电流与热力学温度成正比,当电阻 R_1 和电位器 R_2 的电阻之和为 1 kΩ 时,输出电压 V_o 随温度的变化为 1 mV/K. 但由于 AD590 的增益有偏差,电阻也有误差,因此应对电路进行调整. 调整的方法为:把 AD590 放进冰水混合物中,调整电位器 R_2,使V_o = 273.2 mV. 或在室温下(25 ℃)调整电位器,使 V_o = (273.2 + 25) mV = 298.2 mV. 这样的调整只在 0～25 ℃附近有较高的精度.



(a) 封装形式　　(b) 基本应用电路

图 B－8－5　AD590 的封装及基本应用电路

(2) 摄氏温度测量电路

如图 B－8－6 所示,电位器 R_2 用于调整零点,R_4 用于调整运放 LF355 增益. 调整方法如下:在 0 ℃时调整 R_2,使输出 V_o = 0,然后在 100 ℃时调整 R_4 使 V_o = 100 mV. 如此反复调整多次,直到 0 ℃时,V_o = 0 mV,100 ℃时 V_o = 100 mV,最后在室温下进行校验. 温度测量精度可以达到0.1 ℃.

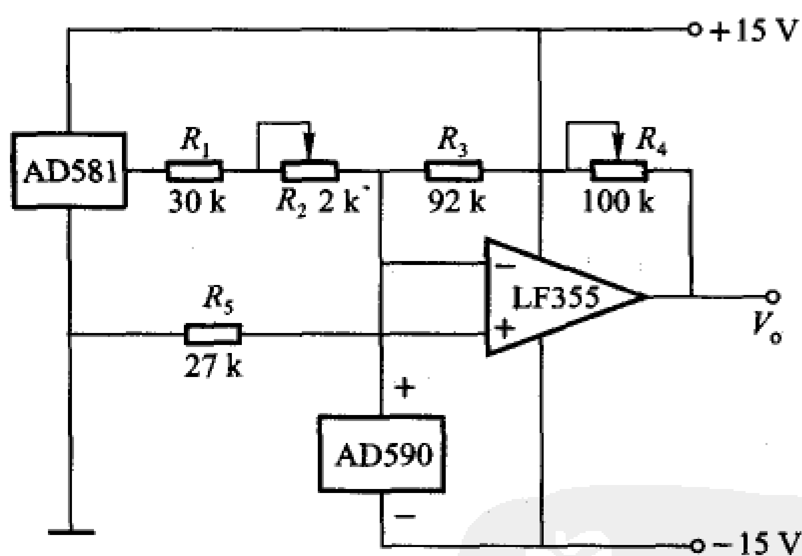


图 B－8－6

(3) 温差测量电路

图 B－8－7 是利用两个 AD590 测量两点温度差的电路. 在反馈电阻为 100 kΩ 的情况下,设 1#和 2#AD590 处的温度分别为 t_1℃ 和 t_2℃,则输出电压为V_o = (t_1 − t_2)100 mV . 图中电位器 R_2 用于调零. 电位器 R_4 用于调整运放 LF355 的增益. 设 R_4 = 90 kΩ,则 $V_o = I(R_3 + R_4) = (I_1 - I_2)(R_3 + R_4)$ mV $= (t_1 - t_2) \cdot 100$ mV/℃. 温度测量精度可以达到 0.001 ℃.

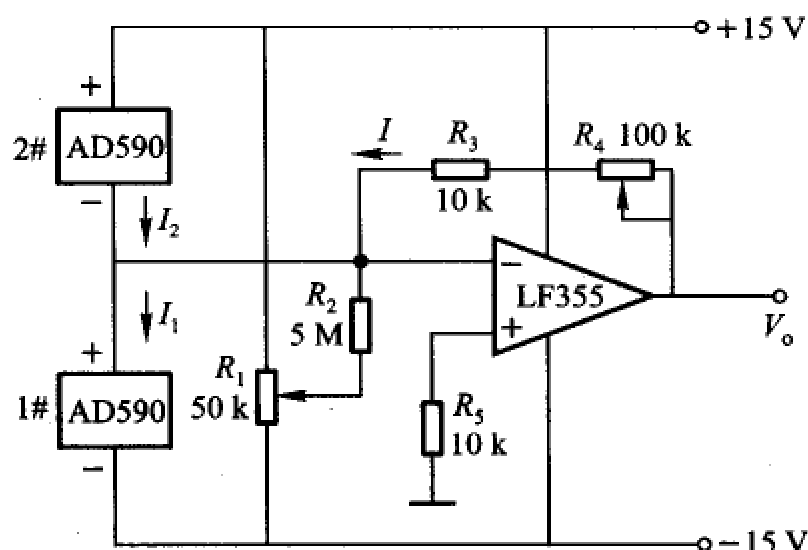


图 B－8－7

参考文献

[1]　戴乐山. 温度计量. 北京:中国标准出版社,1984

[2]　秦世才,钱其璥,等. 集成运算放大器实用电路. 天津:天津科学技术出版社,1981

实验 B－9　霍耳元件传感器的研究

任务与要求:

(1) 半导体导电类型的确定

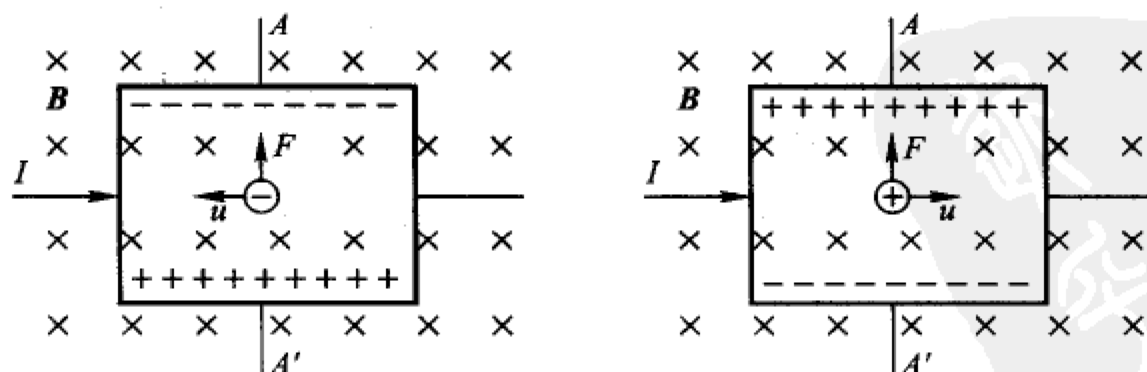


图 B－9－1　霍耳效应原理图

在图 B－9－1 中,工作电流 I、磁场 B 的方向确定后,则 A、A' 两端电压的正负由载流子类型确定,按上图所示的 I、B 方向,AA' 电压为正,载流子为空穴,是

P 型半导体；AA'电压为负，载流子为电子，是 N 型半导体（附加电压较小，只影响 AA'电压的大小，不会改变其正负）.

（2）半导体材料载流子浓度 n 的测量

霍耳灵敏度 $K_H = 1/ned$，e 是元电荷，d 是半导体材料厚度，若 B 已知，由
$U_H = \frac{1}{ne}\frac{IB}{d} = R_H\frac{IB}{d}$

可求出 K_H，则可求出载流子浓度 n.

（3）微位移的测量

如图 B－9－2 所示，两块磁场相同的永久磁铁，同极性相对放置. 当其表面积远远大于两者的间距时，正中间磁感应强度 $B=0$，在缝隙间沿 x 轴形成一个均匀梯度的磁场 $\mathrm{d}B/\mathrm{d}x = k$（常数）. 把 $B=0$ 处作为位移的参考原点，则 $x=0$ 时，$B=0$，$U_H=0$. 当霍耳元件移动到 x 处时，U_H 大小由 x 处的 B 决定. 由式 $U_H = K_H IB$，K_H 是常数，保持 I 不变，则 $\mathrm{d}U_H/\mathrm{d}x = K_H I\mathrm{d}B/\mathrm{d}x = K_H Ik = K$. K 称为位移传感器的输出灵敏度，积分后得

$$U_H = Kx$$

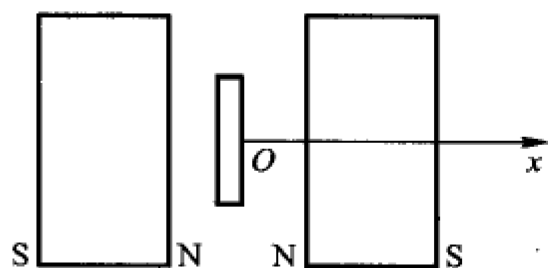


图 B－9－2　位移测量原理图

磁场梯度越大（缝隙越窄），灵敏度越高；磁场变化越均匀，U_H 与 x 的线性越好. 这种位移传感器的分辨率可达 10^{-6} m. 同时，这种传感器还可测速度、振动频率、压力等. 测压力时，在霍耳传感器与压力之间接一个弹性形变体，压力使弹性形变体发生弹性形变，形变后推动霍耳传感器位移，所以，压力与霍耳电压也成线性关系.

实验 B－10　用伏安法测低电阻

测量电阻的伏安法，即测量电阻器两端的电压 U 和通过电阻器的电流强度 I，则所测电阻器的电阻值 R 为

$$R = U/I$$

这种方法一般用于测量中等程度电阻，而测量精确度较低.

测量低电阻一般用开尔文双电桥，由于接触电阻及导线电阻的影响，而难于用伏安法进行测量.

现在此实验要求设计用伏安法去测低电阻，而测量不确定度又近似于双桥法的测量结果.

首先应用一开尔文双电桥测一铜棒上长度为 l 的一段电阻 R，并计算其不确定度 $u(R)$.

设计用伏安法测同一段铜棒的电阻，如何安排实验方可使测量结果达到上述要求？

根据以上实验，能否设想一新的测量低电阻的实验仪器.

实验 B－11　示波器作为交流电桥平衡指示器的研究

用交流电桥测量电容或电感时，其平衡指示器一般用交流毫伏表，如图 B－11－1所示.

按理论，交流电桥平衡时，BD 两点信号的峰值相等、相位一致，而交流毫伏表只能反映 BD 间电压的有效值，这给电桥的平衡调节造成不便.

此实验要求设计用示波器作平衡指示器，即将 BC 和 DC 的信号分别用运算放大器放大后，送入示波器去比较（图 B－11－2）.

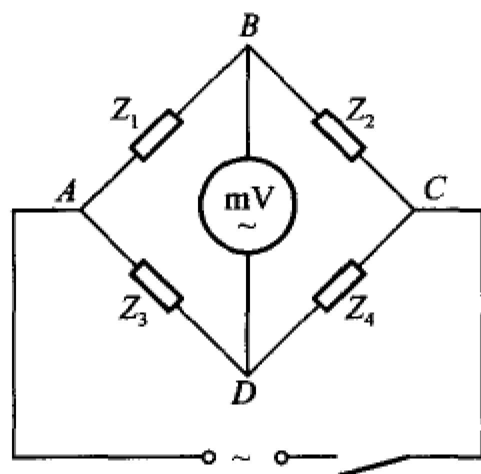


图 B－11－1

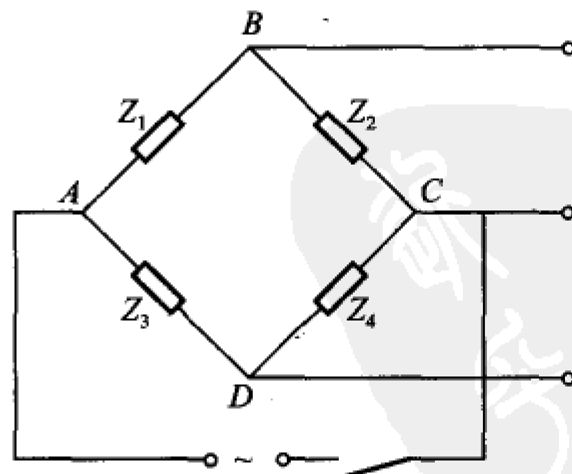


图 B－11－2

分别用交流毫伏表和示波器作为平衡指示器进行测量，说明其差异.

运算放大器，可用通常使用的 μA741 或其他型号的.

实验 B－12 磁铁穿过线圈时产生的感应电动势极大值的测量

使磁铁自由落下穿过一线圈，从而产生感应电动势．在磁铁穿过线圈过程中，此感应电动势经历一由小变大，再由大到小的变化．在此要求设计一实验，测量出此感应电动势的极大值 U_{max}．

可以考虑图 B－12－1，由线圈 L 产生的感应电动势向一电容器 C 充电，经几次充电，可使电容器两极间电压等于要测的感应电动势的极大值，最后测电容器的电压得 U_{max}．a、b 间要加入防止电容漏电的器件，c、d 间要加入电容器电压已等于感应电动势极大值的指示器．要设计如何测量电容器的电压．

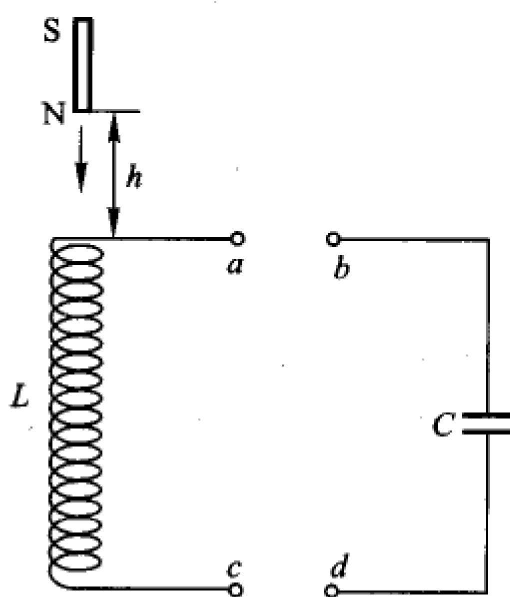


图 B－12－1

最后要求测出磁铁的初始高度 h 和感应电动势极大值 U_{max} 的关系（经验公式）．

实验 B－13 玻璃堆与偏振光

如图 B－13－1 所示将几片玻璃片（可用生物实验用载玻璃）叠在一起，当自然光以布儒斯特角 i_B 入射时，反射光为线偏振光，透射光为部分偏振光，这就是玻璃堆．设计一方案，检验透射光中偏振光所占百分比，检验用几片玻璃片时，透射光中偏振光的百分比大于 90%？

用这样的玻璃堆为起偏器和检偏器做如下二实验：

(1) 将透明的塑料薄膜剪成小块，贴在玻璃板上（最好是各种不同方向），拼成一图形，放在偏振光中，在检偏器后面观察，并转动检偏器，对观察到的现象加以简单说明.

(2) 取一段长 l 约 10 cm，宽 a 约 1 cm，厚 b 约2 mm的有机玻璃板条，用力压弯，放在偏振光中观察，将看到板条中有弯曲的干涉条纹，这种实验称为光弹性实验，利用它可模拟研究一机械构件内部的应力分布情况.

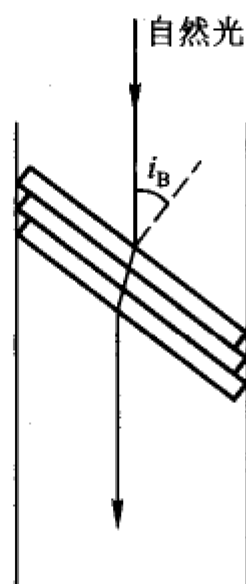


图 B－13－1

实验 B－14　叶绿素的吸收光谱

取不同植物的叶子，剪碎后分别泡在酒精中，一天后浸出叶绿素的液体呈绿色，用摄谱仪或其他分光装置取得浸出液的吸收光谱及强度分布曲线. 分析其吸收光谱有几个吸收带、吸收带的波长范围、吸收极大值的波长. 参考植物学对此吸收光谱的意义进行说明.

实验 B－15　白炽灯与热辐射

绝对黑体的能量输出速率 $\frac{dE}{dt}$，按斯忒藩－玻耳兹曼定律为

$$\frac{dE}{dt}=A\sigma T^4 \qquad (B-15-1)$$

式中 $\sigma=5.67\times10^{-8}\ W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}$是斯忒藩－玻耳兹曼常量，$A$ 是辐射体的表面积，T 为热力学温度.

此实验要求研究白炽灯的热辐射问题，灯丝的能量输出速率应等于其消耗的功率 P，即

$$\frac{dE}{dt}=P=V\cdot I \qquad (B-15-2)$$

式中 V 为灯丝所加电压，I 为通过的电流. 由于白炽灯的灯丝是金属钨，它不是绝对黑体，其辐射规律应是[1]

$$P=A\varepsilon\sigma T^4 \qquad (B-15-3)$$

式中 ε 是灯丝的发射本领，它和物质、表面状态及温度有关，对给定的白炽灯灯丝，ε 是热力学温度的函数.

此实验的具体要求是：

(1) 白炽灯的辐射是否符合式(B－15－3)的规律，发射本领和温度的关系如何.

(2) 真空灯泡和充气灯泡的辐射有否差异？

灯丝温度 T 的测量，可由其电阻 R 去求，$R-T$ 关系的一个经验公式为[1]

$$R = R_0(1 + aX + bX^2 + cX^3), \quad X = \frac{T - T_0}{T'}, T' = 1\,000\ \text{K} \quad (B-15-4)$$

式中 T_0 为室温(单位为 K)，R_0 为室温时的电阻值(单位为 Ω)，$a = 5.238$，$b = 0.7$，$c = 0.062$. 对一定的 R(单位为 Ω)值求 T(以 K 为单位)时，可用迭代法(详见本实验之后的[附注])去计算. 求 R_0 时要给灯丝通电，由于灯丝的热容量很小，通电后灯丝温度就升高，因此求出的不是室温条件下的电阻值 R_0，为此要设计求出电流 $I = 0$ 时的电阻值.

对于充气的灯泡，其中气体的对流是能量传输不可忽视的一面，其消耗功率 P 和灯丝温度 T 的关系将不同于真空灯泡.

可分别用 25 W、40 W 和 60 W 的灯泡去测量，另外要选一"PHILIPS"牌灯泡去比较，因为后者可能是充气的灯泡.

[附注] 迭代法计算的一个 BASIC 程序.

```
10  INPUT "R0,T0 =";R0,T0
15  INPUT "T =";R
20  IF R =0 THEN 50
25  E =.0000001        (E 为控制精度).
30  X =1
35  G =(R/R0 -1 -.7*X^2 -.062*X^3)/5.238
40  IF ABS(G -X) <E THEN LPRINT"T =";G*1000 +T0:GOTO 15
45  X =G:GOTO  35
50  END
```

参考文献

[1] Prasad B S N. A Laboratory experiment on the application of stefen's law to tungsten filament electric lamps. Am. J. Phys., 1978, 46(4):420-423

C. 计算机辅助实验

实验 C-1　*RC* 充放电实验

目的

1. 了解声卡测量的基本原理；
2. 以 *RC* 充放电电路为例，通过声卡使计算机与实验相结合.

仪器与用具

- 声卡测试仪器组成

包括：主机、显示器、Φ3.5 立体声插头、电缆、自制实验线路板(图 C-1-1).

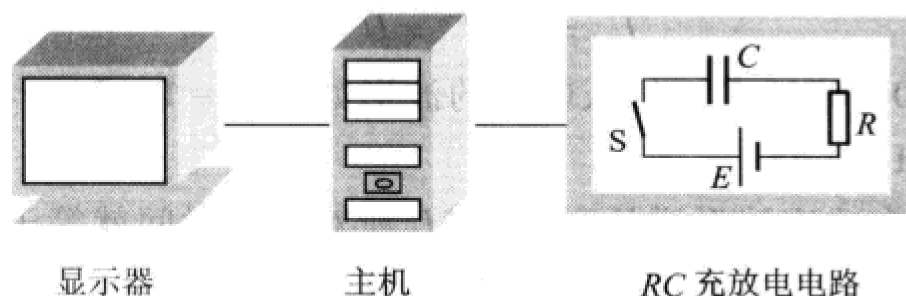


图 C-1-1　*RC* 充放电实验设备

- 教学软件包

包括：基于 LabWindows/CVI 的虚拟示波器软件、万能声卡驱动软件包.

原理

1. 声卡测量的基本原理

声卡是个人电脑中不可缺少的一部分，在一块声卡上有晶振、AD/DA 转换芯片和数字信号处理芯片及其他辅助电路. 因此，它可以作为数据采集卡使

用[1],不过被采信号的频率被限制在音频范围之内.设定了采样频率、采样位数、缓冲区大小之后,再利用声卡的DMA方式进行数据采集工作.本文在LabWindows/CVI环境下,借助硬件驱动程序对声卡的采样频率、采样位数、缓冲区大小等分别进行控制,根据用户的需要调整波形显示,进行波形分析,从而构成功能强大的虚拟存储示波器[2].本虚拟示波器所能测量的信号全部为弱电,大约为1VAC以下的信号(一般由声卡的性能决定),如果要测量更大的信号,需要将信号衰减到量程以内.普通声卡具有16位的量化精度,数据采集频率是44 kHz,完全可以满足特定应用范围内数据采集的需要.

2. *RC*充放电原理

电路的过渡过程是指从一种稳定状态转到另一种稳定状态所经历的变化过程,其变化十分短暂而且是单次变化过程[3],因此,我们利用NE555方波发生电路输出的方波来模拟阶跃激励信号,即令方波输出的上升沿作为零状态响应的正阶跃激励信号;方波下降沿作为零输入响应的负阶跃激励信号,选择方波的重复周期远大于电路的时间常数τ,就可以观测电路的过渡过程.在阶跃信号下,*RC*一阶电路的零输入响应和零状态响应分别按指数规衰减和增长,其变化的快慢决定于电路的时间常数τ.

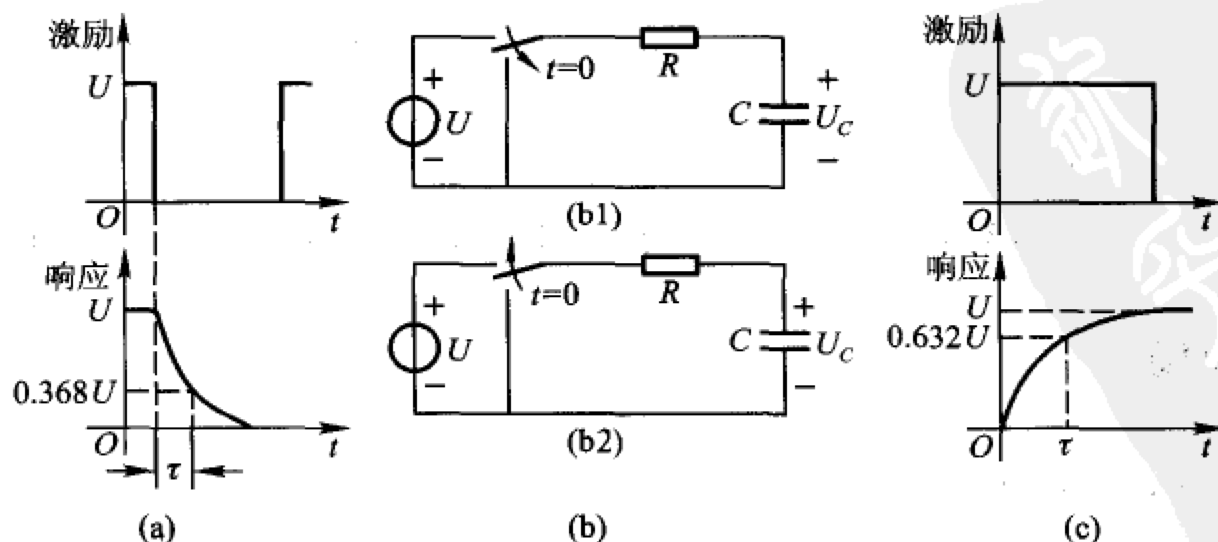
3. 时间常数τ的测定方法

(1) 方程(C-1-1)是电容放电方程,其中U是放电前电容两端的电压,时间常数$\tau = RC$.则

$$U_C = U^{-t/RC} = U^{-t/\tau} \qquad (C-1-1)$$

当$t=\tau$时,$U_C \approx 0.368U$.其零输入响应的波形如图C-1-2(a)所示,测试电路如图C-1-2(b1)所示.

(2) 由零状态响应波形增长到$0.632U$所对应的时间就等于τ.其测试电路及波形如图C-1-2(b2)和图C-1-2(c)所示.



图C-1-2 *RC*一阶电路

（3）微分电路和积分电路是 RC 一阶电路中较典型的应用电路，它对电路时间常数 τ 和输入信号的周期 T 有着特定的要求．RC 串联电路，如果满足 $\tau = RC \ll T/2$（T 为方波脉冲中的重复周期），且由 R 端作为响应输出，这就成了一个微分电路：

$$U_R = iR = RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \approx RC\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} \qquad (C-1-2)$$

由式（C－1－2）可知，电路的输出信号电压与输入信号电压的微分成正比，电路如图 C－1－3（a）所示．

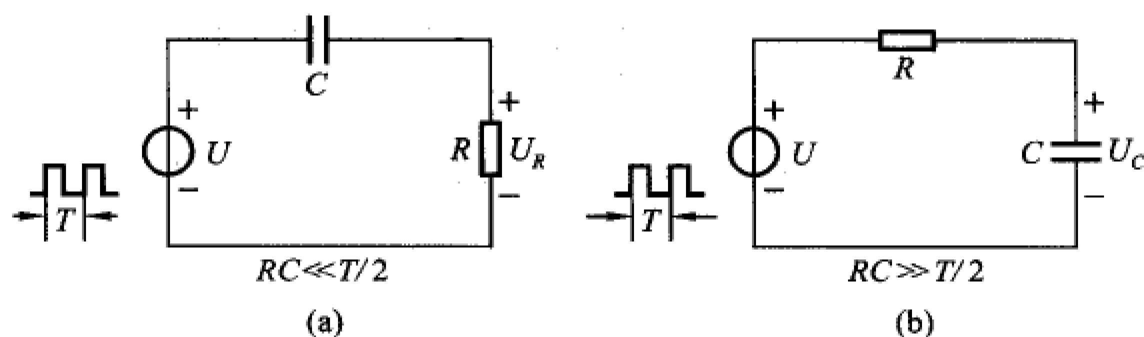


图 C－1－3　微积分电路

如将图 C－1－3（a）中的 R 与 C 位置调换一下，即由 C 端作为响应输出，且当电路参数的选择满足 $\tau = RC \gg T/2$ 条件时，则称为积分电路：

$$U_C = \frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t \approx \frac{1}{RC}\int U\mathrm{d}t \qquad (C-1-3)$$

由式（C－1－3）可知，电路的输出电压与输入电压的积分成正比，电路如图 C－1－3（b）所示．

实验内容

1．实验线路板原理图如图 C－1－4 所示，认真检查线路板，确定激励信号与响应信号的连接端子所在的位置．

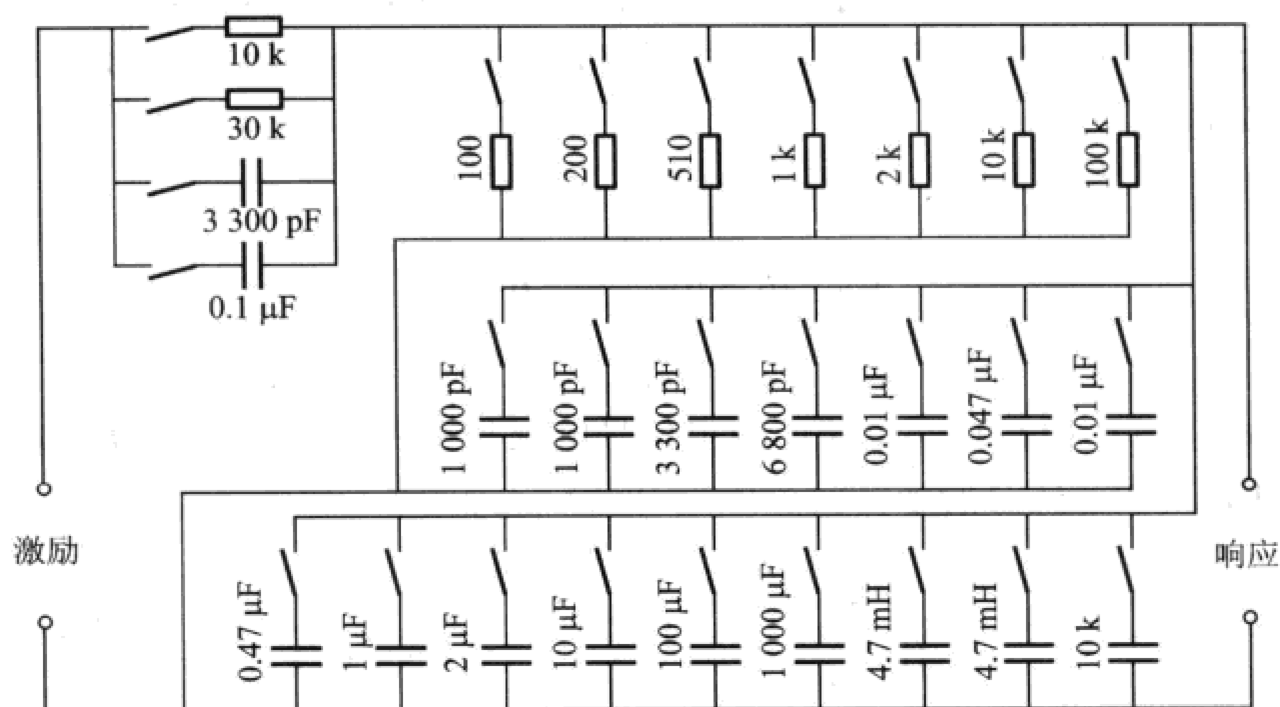


图 C－1－4　实验线路板原理图

2. 设置声卡

设置时按以下步骤进行：

(1) 打开声音高级控制.

(2) 选择录音属性，打开录音音量控制面板，将输入方式选成 Line，如图 C－1－5所示.

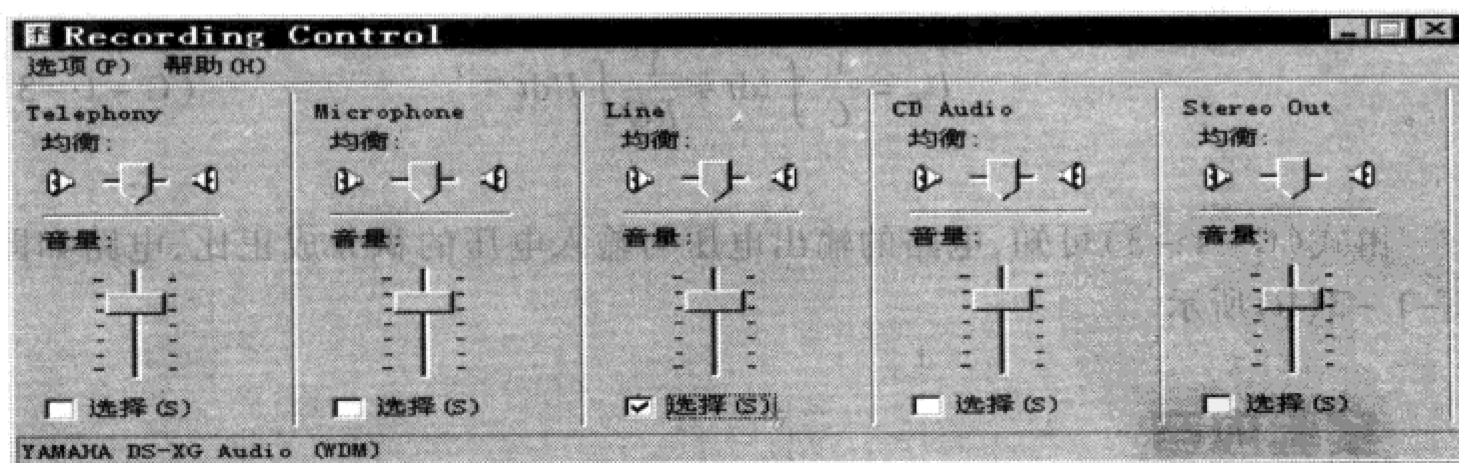


图 C－1－5　声卡设置界面

(3) 关闭不必要的声音特效，如混响环绕，以避免左右声道互相干扰.

(4) 如果无信号时背景噪声较大，可尝试将一些选项静音，特别是 CD 音频.

（5）调整输出和输入的平衡，可借助示波器部分和信号发生器部分实现.

这时信号是从 Line In 口输入的. 在输出音频信号时，输入口是没有信号的.

如果使用其他声卡，可参照以上步骤设置. 注意使用万能声卡驱动程序或自带驱动程序，不要使用 Windows 带的驱动程序. 如果仍无法正确工作，可换一个驱动程序试试. 可能出现的情况：

① 声卡上没有 Line In 口，只有 MIC 口，在一些廉价主板集成的声卡上会有这种情况，因为 MIC 口通常是单声道，也就是示波器只能单踪工作.

② 打开信号发生器，示波器上同时显示波形，这是输出反馈到输入端造成的，可修改各项设置.

3. 在实验线路板上选取 $R=10\ \mathrm{k\Omega}$，$C=0.01\ \mu\mathrm{F}$ 组成如图 C－1－2(b) 所示的 *RC* 充放电电路. NE555 信号发生器输出的方波信号电压 $U=3\ \mathrm{V}$，频率 $f=1\ \mathrm{kHz}$，将自制电缆线 Φ3.5 立体声插头插入声卡的 Line In 或 MIC 输入接口，另一边接到实验线路板上的激励端口所在位置.

4. 在虚拟示波器上观察激励与响应的变化规律，来测时间常数 τ，通过调整虚拟示波器界面上的增益、时基和网格按钮，可清晰地观测 *RC* 的响应曲线，并可计算出时间常数 τ. 对于 $R=10\ \mathrm{k\Omega}$，$C=0.01\ \mu\mathrm{F}$ 的 *RC* 响应曲线如图 C－1－6 和图 C－1－7 所示.

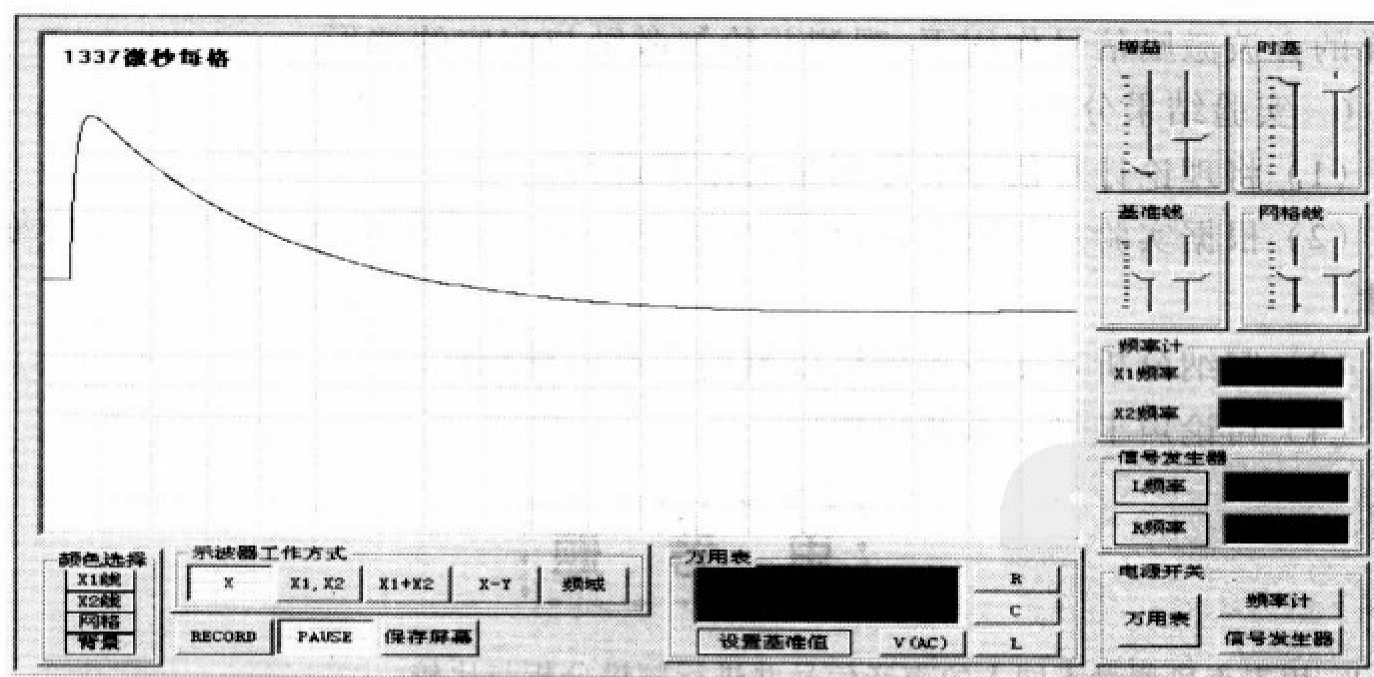


图 C－1－6　*RC* 放电响应曲线

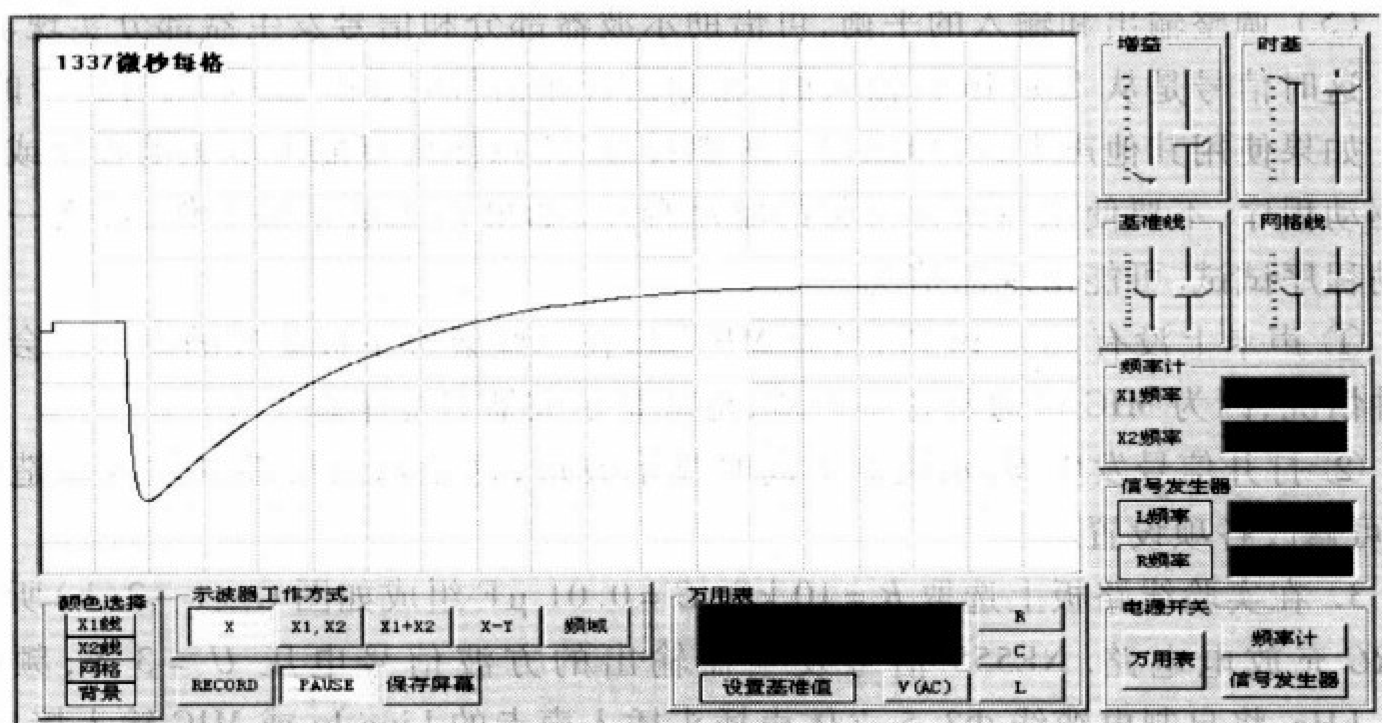


图 C-1-7 *RC* 充电响应曲线

5. 适当地改变电容或电阻值，观察波形变化情况，记录观察到的现象.

(1) 选取 $R=10\ \text{k}\Omega, C=0.47\ \mu\text{F}$，观察并绘制响应的波形，继续增大 C 之值，定性地观察对响应的影响.

(2) 选取 $R=100\ \Omega, R=0.1\ \mu\text{F}$ 组成如图 C-1-3(a)所示的微分电路，在同样的方波激励信号作用下，观测并绘制激励与响应的波形.

6. 实验结果分析

(1) 将理论计算值与实际测量的结果进行比较

(2) 根据实验所得结果，得出微分电路与积分电路的波形差异与一般变化规律.

(3) 归纳分析基于声卡测试仪器的优点和局限性.

(4) 讨论声卡测试系统应用.

思 考 题

1. 用麦克风测量不同人的声音信号并进行频谱分析与比较.
2. 用声卡作为 D/A 输出自制简易信号发生器.

参 考 文 献

[1] 种兰祥，阎丽，张首军. 基于计算机声卡的多通道数据采集系统. 西北大学学报，2002，32(6)：629—632

[2] 孙晓云，郭立炜，孙会琴．基于 LabWindows/CVI 虚拟仪器设计与应用．北京：电子工业出版社，2005

[3] 康华光，陈大钦，电子技术基础（模拟部分）．北京：高等教育出版社，2001

实验 C－2　用计算机观测交流磁滞回线

目的

1．了解软磁材料在交变磁场中的磁特性；
2．了解软磁材料的基本动态磁性参数；
3．学习用计算机观测交流磁滞回线的方法．

仪器和用具

YB1631 型功率函数发生器、计算机、打印机、CZD－1 型 $B-H$ 回线仪和 MCS－2 型 A/D 转换卡及示波软件．

原理

软磁材料在电机、电器和仪表的设计制造中有广泛用途，其交流磁特性可从交流磁化曲线和交流磁滞回线的形状和面积上集中表现出来，通过观测交流磁化曲线和交流磁滞回线，能够较完整地了解软磁材料的磁特性，这对研究软磁材料的性能及其应用有非常重要的意义．·

交流磁滞回线，通常简称交流回线．在交流磁化过程中，不同的交流幅值磁场强度 H_m，可有不同的交流回线，各交流回线顶点的轨迹，称为交流磁化曲线或简称 B_m-H_m 曲线，B_m 称为幅值磁感应强度．交流幅值磁场强度达到饱和磁场强度 H_s 时，B_m 不再随 H_m 明显变化，B_m-H_m 关系呈现为一条趋于平直的可逆曲线，交流回线的面积不再随 H_m 变化，这时的回线，称为极限交流回线．由极限交流回线，可确定材料的饱和磁感应强度 B_s，交流剩余磁感应强度 B_{ra}，交流饱和矫顽力 H_{cs}（如图 C－2－1 所示）．幅值磁导率 μ_a，则可由交流磁化曲线按下式求得：

$$\mu_a=\frac{B_m}{\mu_0 H_m} \qquad (C-2-1)$$

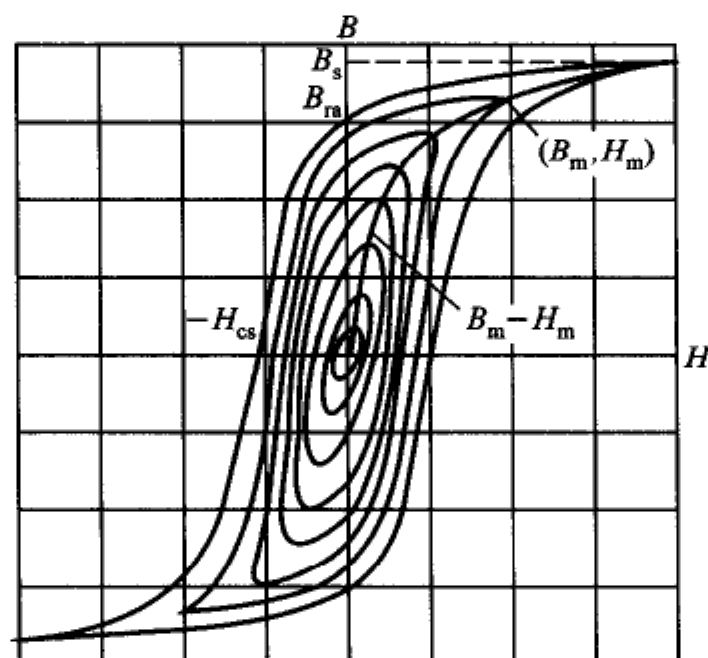


图 C－2－1 交流磁滞回线

仿照静态磁化的初始磁导率和最大磁导率，也可把交流磁化时的 μ_{ai} 和 μ_{am}，分别称为初始幅值磁导率和最大幅值磁导率，如图 C－2－2 所示. B_s、B_{ra}、H_{cs}、μ_{ai} 和 μ_{am} 合称为交流回线参数，也是软磁材料的基本动态磁性参数.

软磁材料的另一个重要磁性参数是铁心损耗 W，所谓铁心损耗是指单位体积软磁材料交流磁化一周损耗的能量 W：

$$W = \oint H \mathrm{d}B \qquad (C-2-2)$$

即交流回线所围的面积. 软磁材料交流磁化一周的铁心损耗的大小与磁化频率 f 和幅值磁感应强度 B_m 有关，通常在不同的 B_m 值，测定 W 随 f 变化的曲线簇，来反映 W 随 B_m 和 f 的变化关系.

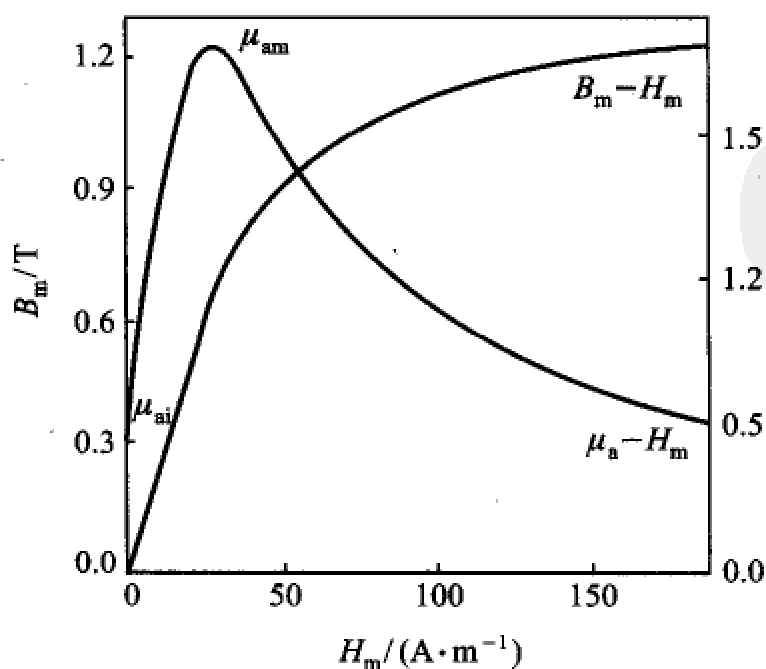


图 C－2－2 B_m-H_m 曲线和 μ_a-H_m 曲线

测量交流回线的方法很多，最常见的是示波器法，如图 C－2－3 所示．其测量电路由交流电源、磁感强度 B 和磁场强度 H 的信号变换电路（简称 B 电路和 H 电路），以及示波器等部分组成，图中 N_1 和 N_2 分别为被测磁环的磁化和测量线圈．根据电磁感应定律，测量线圈上的感应电动势 e 与磁环中磁感应强度 B 的关系为

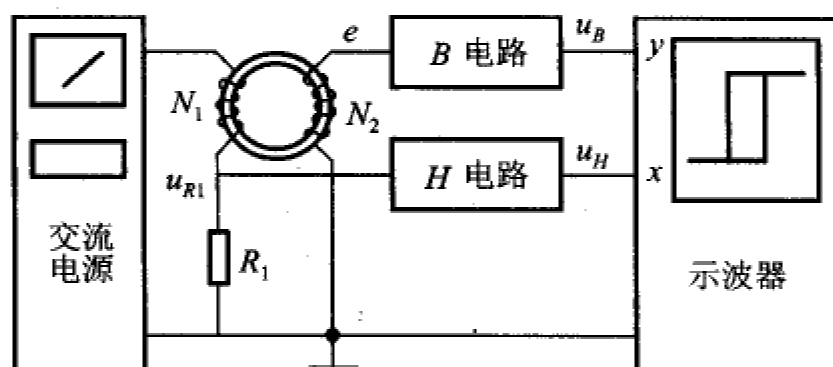


图 C－2－3　示波器法的原理图

$$e = N_2 S \frac{dB}{dt} \qquad (C-2-3)$$

式中 S 和 N_2 分别为磁环的横截面积和测量线圈的匝数，由于 e 正比于磁感应强度对时间的微分，示波器 y 轴方向显示的电压要正比于磁感应强度 B，B 电路应是一个积分电路，其输出为 u_B；若 B 电路的输入阻抗很大，则测量线圈 N_2 中的电流很弱，其产生的磁场可以忽略，磁化场仅由磁化线圈 N_1 中电流 i 产生，根据欧姆定律和安培环路定律，串入磁化线圈回路的无感小电阻 R_1 上的电压与磁化线圈 N_1 产生的磁化场强度 H 的关系为

$$u_{R1} = iR_1 = \frac{R_1 LH}{N_1} \qquad (C-2-4)$$

式中 L 为磁环的平均磁路长度，即 $L = \pi\overline{D}$，$\overline{D}$ 为磁环的平均直径，由于 u_{R1} 直接与磁场强度 H 成正比，在一般情况下，H 电路只是一个电压衰减或放大电路，其输出为 u_H.

采用普通示波器观测交流回线，在回线参数的测量、不同磁化条件下的交流回线的比较观测、回线面积的计算以及回线的记录保存方面，都有许多不便．而计算机具有显示数字和图形、数据暂存、数值计算和存盘及打印的功能，配上 A/D转换卡，编制相应的示波软件，可用计算机模拟示波器，实现普通示波器所不具备的存贮、计算和打印功能，用于观测交流回线，则可以克服用示波器观测的上述不便.

要用计算机显示交流回线，则要求用程序模拟示波器的 $x-y$ 显示方式，其编程思路是先将计算机显示卡设置成图形模式，启动 A/D 卡的两个通道交替采

集至少一个信号周期的B路和H路的电压信号，用B路信号计算在显示屏上的行偏移，用H路信号计算在显示屏上的列偏移，调用 BIOS 中断 INT10H，或直接对显示卡编程，向行偏移和列偏移对应的显示内存送一颜色代码，在显示屏上画出一个像素点，待一条交流回线绘完后，再启动 A/D 卡采集信号；在绘下一条交流回线的同时，先清上一条交流回线，如此循环地实时显示出交流回线；在此循环中，调用 DOS 中断 INT21H06h 功能嵌入键盘功能键动态查询和各功能键对应的子程序，以实现示波器的大部分功能. 由于常用的计算机只有一个 CPU，一般的 A/D 卡上，虽然有多个输入通道，但是只有一个 A/D 转换器，要保证x和y输入的两路信号同步采集是不可能的，若在一轮采样中两路信号交替采集，可使两路信号采集时间的差别最小. 即使这样，在两路信号之间也会引入相位差，后采集的一路信号比先采集的一路信号相位超前$\Delta\varphi$. 显示交流回线时，磁感应强度信号u_B先采集，磁场强度信号u_H后采集，这样，在微机显示屏y方向和x方向上显示的信号与原信号的关系为

$$\begin{aligned} u_y &= u_B \\ u_x &= u_H e^{i\Delta\varphi} \end{aligned} \qquad (C-2-5)$$

若在后采集的H路信号送入 A/D 卡前，先经过移相电路，让信号的相位滞后$\Delta\varphi$，则可以补偿掉交替采集两路信号而引入的相位差. 因此，在显示交流回线的实验装置中，在常见的示波器法的H电路中，增加了一个移相电路.

实验装置的原理图如图 C-2-4 所示. 被测磁环的横截面积S为 3.2 cm，平均周长L为 18.7 cm，B电路是 A_1 运放构成的密勒积分电路，其输入为式(C-2-3)中的e，输出u_B与磁感应强度B的关系为

$$u_B = -\frac{N_2 S}{R_2 C_2} B \qquad (C-2-6)$$

H电路是 A_2 运放构成的移相电路，其输入为式(C-2-4)中的u_{R1}，输出u_H与磁场强度H的关系为

$$u_H = -u_{R1} e^{i\varphi} = -\frac{R_1 L}{N_1} H e^{i\varphi} \qquad (C-2-7)$$

式中φ为移相电路引入的相移，

$$\varphi = -2\arctan(\omega R_{w_2} C_1) \qquad (C-2-8)$$

式中ω为信号的角频率，R_{w_2}为 w_2 的电阻.

在观测交流回线前，将图 C-2-4 中开关 S_2 掷u_{R1}位置，计算机交替采集到的两路信号，是移相前后的同一信号，若$\varphi=0$，且$\Delta\varphi=0$，由式(C-2-7)，移相

前后的相位差为 π，在计算机显示屏上应显示一条处于二和四象限的直线．但是，实际上 $\Delta\varphi\neq0$，这条直线就张开成两端相连的两条弧线．调节 w_2，使两条弧线合并为一条直线，则移相电路的移相正好补偿交替采样引入的移相，即

图 C－2－4　实验装置的原理图

$$\varphi = -\Delta\varphi \qquad (C-2-9)$$

将式(C－2－9)代入式(C－2－7)，并将式(C－2－6)和式(C－2－7)中的负号反映到 B 和 H 的相位因子之中，再把式(C－2－6)和式(C－2－7)代入式(C－2－5)，得

$$\begin{aligned} u_y &= \frac{N_2 S}{R_2 C_2} B \\ u_x &= \frac{R_1 L}{N_1} H \end{aligned} \qquad (C-2-10)$$

显然，显示屏上显示的两路信号，保持了磁感应强度和磁化场强度之间原有的相位关系．

由式(C－2－2)和式(C－2－10)，可得磁环的铁心损耗为

$$W = \frac{R_2 C_2}{N_2 S} \cdot \frac{N_1}{R_1 L} \oint u_x \mathrm{d} u_y \qquad (C-2-11)$$

其中的积分为显示屏上交流回线的面积

$$A = \oint u_x \mathrm{d} u_y$$

为简单起见，用梯形法求数值积分，交流回线的面积

$$A = \sum_{i=1}^{k \cdot n} \frac{1}{2k}[D_x(i+1) + D_x(i)] \times [D_y(i+1) - D_y(i)] \qquad (C-2-12)$$

式中 k 为一轮采样采集到的数据所包含的信号周期数，n 为一个周期信号被采集到的数据长度，$D_x(i)$ 和 $D_y(i)$ 分别是 x 和 y 方向上信号的第 i 组数据. 计算机按式(C－2－12)计算出交流回线的面积，并在屏上把数字显示出来，代入式(C－2－11)可以算出铁心损耗.

实验内容

要完成下列实验内容，必须熟悉示波软件的使用，示波软件的各项功能由操作功能键来实现，在显示屏的下部有功能键的功能提示. “ESC”锁定/释放键，锁定后，F1 键控制进入/退出光标显示，F9 键控制进入/退出多回线暂存；进入光标显示后，F5 键计算回线面积；进入回线暂存后，F9 键暂存回线并退出，F4 键进入/退出多回线显示；进入多回线显示后，F5 键显示暂存的各条回线；其他功能见屏上提示.

1. 基础实验

(1) 观测交流回线随幅值磁化场强度 H_m 的变化

将图 C－2－4 中 B 信号输出和 H 信号输出接到 A/D 卡 6 号和 7 号通道上，S_1 开关掷“1”位置，这时磁化频率为 50 Hz，S_2 开关掷“u_{R1}”位置. 启动计算机，并运行示波软件，选择模拟示波器的 $x-y$ 显示方式，并选择相应的信号输入通道. 然后，打开实验装置背后的工作电源开关，调节电位器 w_1，在屏上显示适当大小的图形，调节 w_2，使在屏上观测到的图形，变成一条处于二和四象限的直线，此时，就完成了磁化频率为 50 Hz 时的相位补偿调整. 将 S_2 掷到“u_B”位置，就可以观测 50 Hz 磁化时的交流回线及其动态参数. 凡磁化频率改变后，均要重新做相位补偿调整.

利用软件的回线暂存功能，可将 8 条不同 H_m 时的交流回线同时显示出来，观测回线的形状随 H_m 的变化，总结回线形状随 H_m 变化的规律.

(2) 测量 50 Hz 磁化时的回线参数

调节 w_1 使屏上显示极限回线，移动屏上的光标测量 B_s、B_{ra} 和 H_{cs} 对应坐标点的电压值，然后代入式(C－2－10)计算出 B_s、B_{ra} 和 H_{cs}. 调节 w_1，使回线消失，再逐渐增大 w_1，逐次记录下 20 条不同大小的回线(要包括极限回线)，对应在屏上右侧显示的信号宽度($x=$)和幅度($y=$)，将这两个值除以 2，代入式(C－2－10)，计算出 H_m 和 B_m，并由式(C－2－1)计算出 μ_a，作出 B_m-H_m 曲线和 μ_a-H_m 曲线，从 μ_a-H_m 曲线确定 μ_{ai} 和 μ_{am}.

（3）观测交流回线随磁化频率的变化

将 S_1 开关掷“2”位置，功率函数发生器的功率输出接到实验装置的信号输入端，信号的频率调到 80 Hz，调整信号源的输出幅度和 w_1 电位器，使交流回线接近极限回线，做相位补偿调整，暂存交流回线；频率减少 10 Hz，并调节 w_1 保证回线的 y 方向幅度不变，再重复相位补偿和回线暂存，直至频率减至 10 Hz，当回线出现不连续时，在未锁定状态按 F9 键消除之；将暂存的 8 条不同频率的交流回线同时显示，并归纳出交流回线随磁化频率变化的特点.

（4）测量铁心损耗随磁化频率的变化

将信号的频率调到 100 Hz，调节信号源的信号幅度和 w_1 电位器，使回线的 y 方向幅度达到适当值，并做相位补偿调整，利用软件功能测算回线的面积，由于回线面积测算的偶然误差较大，应按误差分析方法，去掉偏离平均值较大的测算值，选出 5 个数值接近的测算值取平均；频率减小 10 Hz，调节 w_1 保证回线的 y 方向幅度不变，再重复相位补偿和面积测算，直至频率减到 5 Hz；由式（C－2－11）计算出铁心损耗，将回线 y 轴方向的电压幅度除以 2，代入式（C－2－10），计算出 B_m，作出在此 B_m 值下，铁心损耗 W 随磁化频率 f 变化的曲线.

（5）测量频率为 50 Hz 时，铁心损耗随 B_m 的变化曲线（测量步骤自拟）.

2. 设计实验

研究铁心中气隙对铁心磁化状态的影响.

由实验室提供一对 U 形铁心以及铁心的交流磁化曲线和交流饱和矫顽力 H_c，请实验者自行设计图 C－2－4 中的电路参数 N_1，N_2，R_1，R_2，R_3，C_2 和 E，并绕制线圈和调整电路参数. 对 U 形铁心做上述基础实验内容；在一对 U 形铁心之间夹一片薄纸形成气隙，再重复上述基础实验；比较有气隙和无气隙时，铁心的磁化状态，并验证等式 $\mu_{ae} = \mu_a/[1 + 2\delta(\mu_a - 1)/L]$，式中 μ_{ae} 和 μ_a 分别为有气隙和无气隙时，在同一磁化场强度下铁心的磁导率，μ_{ae} 又称有气隙时铁心的有效磁导率，δ 为纸片的厚度，L 为铁心的磁路长度.

（提示：① 一般来说，H_m 取到 3～5 倍 H_{cs}，交流回线已趋近极限回线；② A/D 卡输入电压的幅值 $U_m = 5$ V；③ 磁化线圈 N_1 上电压降的有效值 $U_1 \approx 4.44 f N_1 B_m S$，$f$ 为磁化频率，S 为铁心的横截面积，B_m 为铁心中的幅值磁感应强度；④ 磁化电源的电动势 $E = U_1 + 0.707 U_m$；⑤ 线圈的线径由下式确定：$d = (4I/\pi J)^{1/2}$，I 为线圈上流过电流的有效值，J 为电流密度，对小功率的情形，J 一般取 2.5 A/mm^2）

注意事项

1. B 信号输出和 H 信号输出的电压不要超过 A/D 卡的输入电压范围. 为什么？

2. 磁化电流的大小要单向调节，逐渐从零增加，或从极限回线时逐渐减小.

为什么？

3. 暂时不测交流回线时，应将磁化电流调到最小. 为什么？

思考题

1. 交流回线的形状与哪些因素有关？在什么情况下交流回线的形状趋近椭圆？

2. 在什么情况下，u_H 和 u_B 是畸变的正弦信号？u_H 和 u_B 信号为什么会畸变？

3. 为什么后采集的 u_H 信号比先采集的 u_B 信号在相位上超前，试分析说明.

4. 气隙对铁心的磁化状态有何影响？为什么在有些使用场合，铁心线圈中要加气隙？试举出一例，并说明之.

实验 C-3 狭缝衍射的研究

光的衍射是重要的物理现象，在普通物理光学实验中，一般要做单缝或双缝衍射实验，不过由于实验时间限制，不能很深入地展开实验，如果将计算机引入此实验，就可使数据采集工作由计算机进行，从而加快了实验的进程，有可能深入展开狭缝衍射规律的探索[1]

目的

1. 利用计算机辅助，对多种缝的衍射进行测量，结合理论分析，加深认识衍射规律；

2. 了解计算机辅助实验的作用，初步认识计算机接口及有关控制程序.

仪器和用具

各种狭缝、计算机、He－Ne 激光器、硅光电池及移动架、运算放大器、接口卡、透镜.

1. 仪器的布置

参照图 C－3－1.

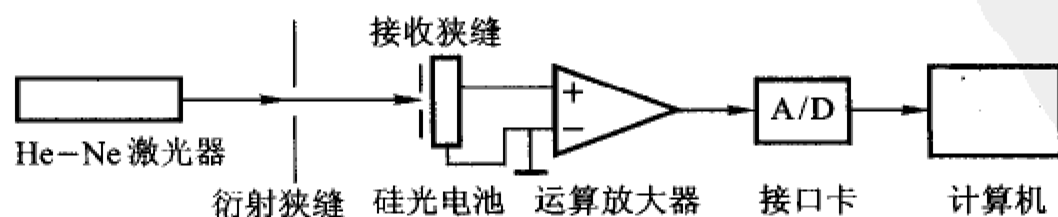


图 C－3－1

2．硅光电池及移动架

硅光电池的市售型号很多，作者使用的是2CR－42[①]，光电池要封在小盒中（图 C－3－2），上面有一接受光照的狭缝（缝宽小于 0.1 mm）．狭缝的长度要小于干涉条纹的长度．

硅光电池可固定在移测显微镜上，转动螺旋带动硅光电池去扫描干涉条纹，进行测量．

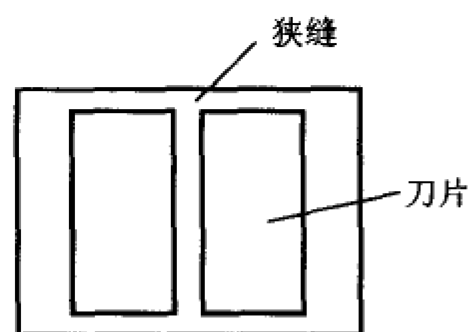


图 C－3－2　封装硅光电池的小盒

3．狭缝的制作

单缝：如图 C－3－3(a)所示，在有机玻璃板上钻一孔，在显微镜下粘上二刀片，刀刃要平行．

缝宽 b 约在 0.1 mm，0.2 mm 和 0.4 mm，共 3 个．

双缝：如图 C－3－3(b)所示，在孔中央粘上一条拉直的金属丝（待粘牢后方可去掉拉力），在金属丝两侧粘上二刀片构成一双缝，要用移测显微镜控制缝宽．

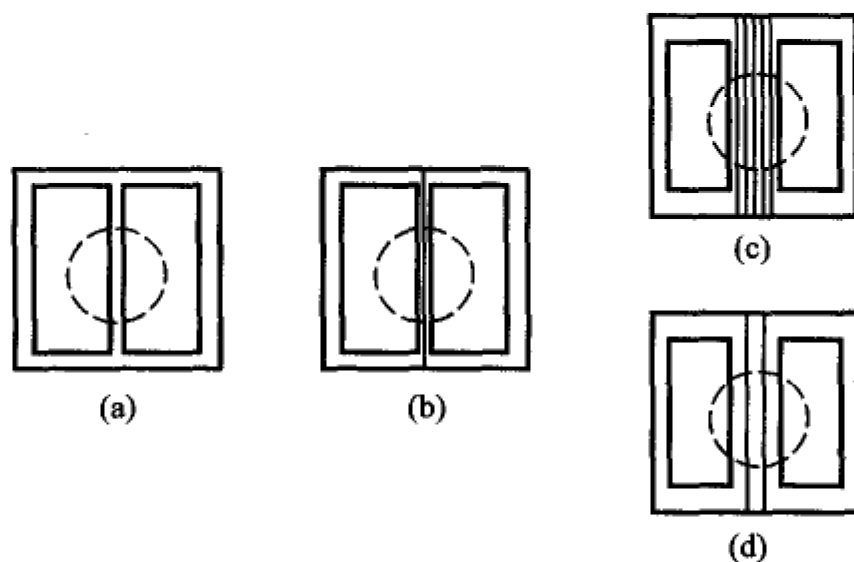


图 C－3－3

可控制：1．b（缝宽）≈ 0.02 mm，d（中心距）≈ 0.06 mm，

2．$b \approx 0.04$ mm，$d \approx 0.08$ mm，

3．$b_1 \approx 0.04$ mm，$b_2 = 2b_1$，$d \approx 0.12$ mm．

第 3 个是不等宽双缝．

三缝：如图 C－3－3(c)所示，在孔上并排粘上 5 条金属丝，两侧紧靠金属丝粘二刀片，待粘牢后将金属丝的第 1、3、5 条切掉，形成三缝[图 C－3－3(d)]．

4．运算放大器及电路

① 北京光电器件厂生产．

使用 ICL7650 运算放大器(图 C－3－4),它有低漂移、高增益和高输入阻抗的特点,放大电路的电压增益 A_V 为

$$A_V = 1 + R_2/R_1$$

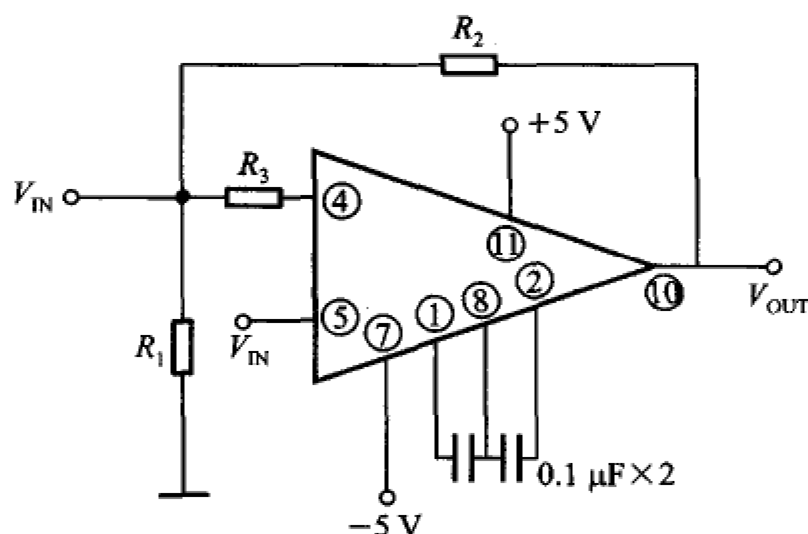


图 C－3－4

实验时根据所用的狭缝的干涉条纹的最大亮度调节 R_1 和 R_2 的比,使放大器输出电压 V_{OUT}不超过 5 V,以适应计算机的要求.

5. 接口卡

用 8 位 A/D 转换,本书绪论 §5 的图 0－5－7 为 8 位 A/D、D/A 转换的接口电路,可供参考.

6. 数据采集及处理程序

数据采集及处理程序附后,程序是用 C 语言编写的.

数据处理主要是将每 50 个采集的数据,平均后,作为一个数值贮存,最后用它绘制强度曲线.

原理

1. 夫琅禾费衍射

图 C－3－5 为夫琅禾费单缝衍射的两种安排,第一种安排是在透镜的焦平面上观察干涉条纹,第二种安排是使狭缝 S 距光源的距离 r_1 和距观测屏 P 的距离 r_2 均相当大,即两种安排均为使实验满足远场条件,由于第二种安排,条纹分散较大,装置又简单,所以此实验按第二种安排观测夫琅禾费单缝和多缝衍射.

为满足远场条件,狭缝上各点到屏的中点 P_0 的距离应远小于波长 λ,设缝宽为 b,缝的中点到 P_0 距离为 r_2,则

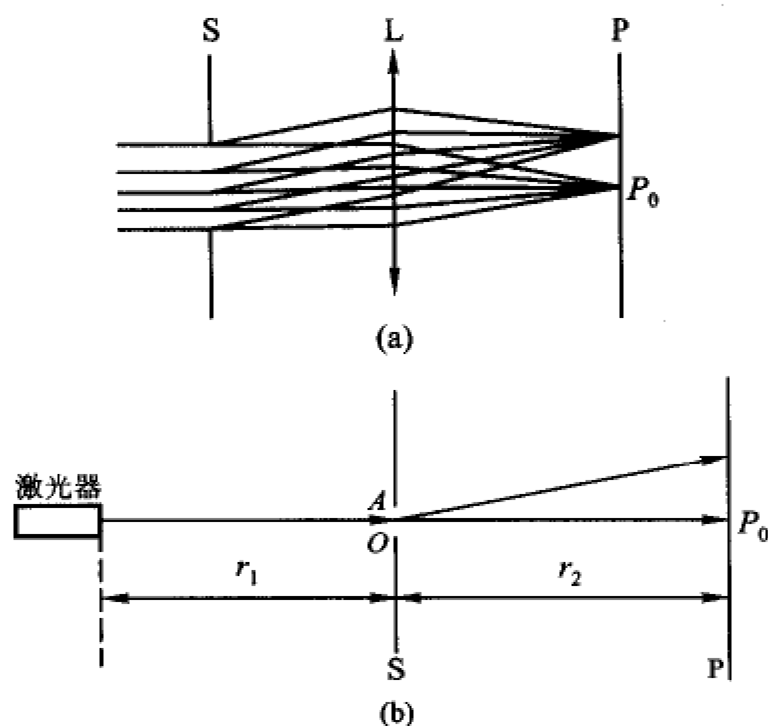


图 C－3－5

$$AP_0 - OP_0 = \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2} - r_2 \approx \frac{b^2}{8r_2}$$

应满足

$$\frac{b^2}{8r_2} << \lambda$$

或

$$r_2 >> \frac{b^2}{8\lambda} \tag{C－3－1}$$

例如，$b = 0.2$ mm 的单缝，$\lambda = 6.328 \times 10^{-7}$ m

$$\frac{b^2}{8\lambda} = 7.9 \times 10^{-3}\ \text{m}$$

取 $r_2 = 1$ m，可近似满足远场条件.

对于 r_1 当满足相似于 r_2 的条件.

2. 夫琅禾费单缝和多缝衍射的强度分布

(1) 单缝

如图 C－3－6 所示将单缝 AB（缝宽为 b）处的波前分割为甚多的小条，每一小条对 P_θ 振动的贡献形成 P_θ 的振动，由于各小条的贡献稍有差异，由矢量合成可得 P_θ 点的振幅 A_θ 为[2]

$$A_\theta = A_0 \frac{\sin\alpha}{\alpha},\ \alpha = \frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta$$

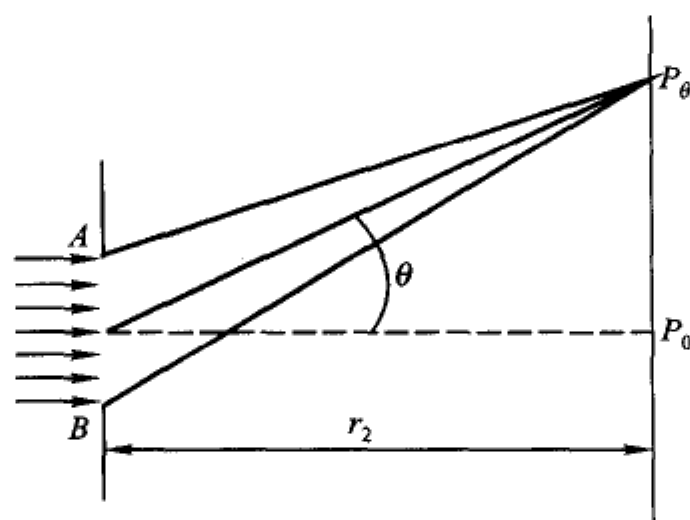


图 C－3－6

A_0 为中央最大振幅，由此可知 P_θ 点的光强 I_θ 与中央极大光强 I_0 的关系为

$$I_\theta = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2 \qquad (C-3-2)$$

（2）多缝

设缝宽为 b，相邻二缝中心距为 d，缝数为 N，是等宽度等间隔的多缝.

同样可由矢量合成法得出 P_θ 的光强分布公式为[2]

$$I_\theta = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2\left(\frac{\sin N\beta}{\beta}\right)^2 \qquad (C-3-3)$$

$$\alpha = \frac{\pi b}{\lambda}\sin\theta$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda}\sin\theta$$

3. 菲涅耳单缝衍射

菲涅耳衍射为近场衍射，可用如图 C－3－7 所示的装置. 单缝的夫琅禾费衍射被压缩到透镜 L 的焦平面上，焦平面以外则为菲涅耳衍射. 但是随着狭缝 S 到透镜 L 距离 r_{21} 的变化，干涉条件可有显著变化，看到的干涉条纹将显著不同.

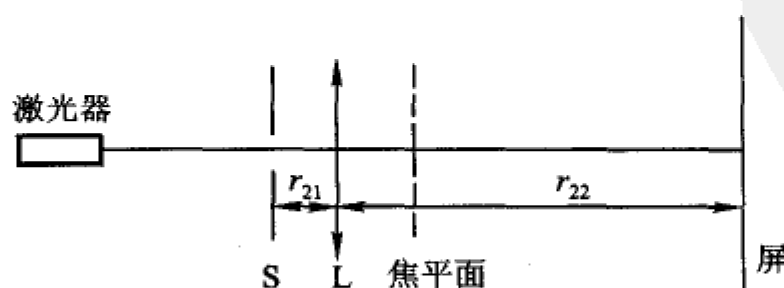


图 C－3－7

图 C－3－8 是用 b＝0.37 mm 的单缝，r_{21} 由 0.2 cm 到14.0 cm 的菲涅耳单

缝衍射图. 可以看出 r_{21} 很小时,接近二直边衍射,r_{21} 较大则接近夫琅禾费衍射,中间的一幅,在二亮纹之间出现一明显的暗条纹.

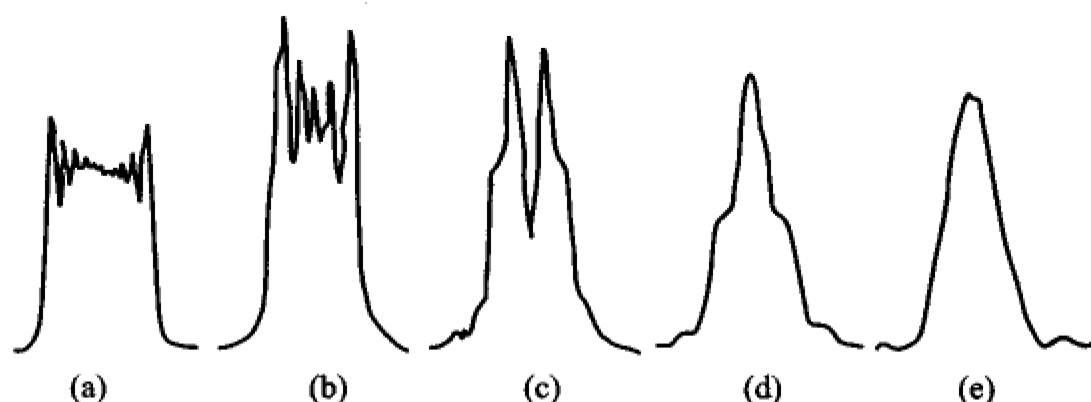


图 C－3－8

实验内容

1. 制作狭缝

先计划实验要观测的内容,按计划制作所需的各狭缝(可多做几个以便选择).

仔细在显微镜下检查狭缝的质量,测量其 b、d 值. 如果 b 很小,用移测显微镜测不准,可以从干涉条纹反推其 b 值,或借助迈克耳孙干涉仪去测量.

2. 组成光强测量系统

参照图 C－3－4 组成运算放大器放大电路,输入一低电压,检查其放大效果,改变 R_1 和 R_2 值,观察输出电压的变化.

将硅光电池接入放大电路,再将放大器和接口卡相接,即构成一光强自动采集系统.

将数据采集程序编入计算机后,即可执行光强自动测量工作.

3. 观测夫琅禾费狭缝衍射

按图 C－3－1 安置光源、单缝和纸屏,观察屏上的干涉条纹,调节缝的位置使干涉条纹左右对称.

移去纸屏,使干涉条纹射向硅光电池,调节狭缝方向使干涉条纹平行于硅光电池狭缝,并使硅光电池的移动范围涵盖干涉条纹的测量区域,检查之后,将硅光电池移到测量区域的一侧.

调试好之后,开始执行程序. 程序开始执行后将停在进入采集数据之前等待键盘输入,在开始移动硅光电池的同时按计算机的任一键进行数据采集.

移动光电池要尽量均匀，速度要适当慢些．移测显微镜的底座要平稳，可用大砝码压在上面．

用光电池扫描干涉条纹的同时，屏上也显示出光强曲线．

为了进一步分析光强曲线，可将屏上曲线打印出来，或自编一段程序，查出曲线的各极大和极小值．

对计划观测的各缝，依次同样进行测量．

4．菲涅耳单缝衍射的测量

参照图 C－3－5(b)组成菲涅耳单缝衍射光学系统，凸透镜焦距约为 4 cm，r_{22}约为 40 cm．r_1 在 30 cm 左右．

用缝宽 $b=0.4$ mm 的单缝，也可用 b 较小的单缝去比较．

对一个缝的测量，要从 r_{21}较小到 r_{21}约为 15 cm 之间多个条件下去测量．

5．绘制夫琅禾费狭缝衍射光强分布的理论曲线

根据强度分布理论公式(C－3－2)、式(C－3－3)和实验中各缝的 b、d 值，自编程序(使用熟悉的计算机语言)绘出曲线．

6．对以上各测量结果进行对比分析．

[附注]数据采集程序

```
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>
#include <iostream.h>
void main()
{
/*定义变量*/
unsigned int x,y,i,j;
unsigned int *ya;
unsigned int k=0;
/*为指针变量 ya 开辟存储空间*/
ya=(unsigned int *)new[640*sizeof(int)];
for (i=0;i<640;i++) *(ya+i)=0;
/*设置显示方式及背景色 添充色 前景色*/
int gd=DETECT,gm;
initgraph(&gd,&gm,"c:\\borlandc\\bgi");
setbkcolor(LIGHTGRAY);
```

```
setfillstyle (SOLID - FILL,LIGHTGRAY);
setcolor(RED);
bar(0,0,639,479);
/*等待键盘输入*/
getch();
/*数据采集及作图*/
for(;;)
{
for (i=0;i<50;i++)
{
inportb(0x320);/*选择通道 IN0—IN7*/
outportb(0x330,0x11);/*启动 A/D 转换*/
/*等待转换结束*/
y=inportb(0x330);
while(y=0){
y=inportb(0x330);
}
x=inportb(0x328);/*读 A/D 转换结果*/
*(ya+k)=*(ya+k)+x;/*累加*/
/*延时*/
for (j=0;j<=1000;j++) outportb(0x320,i/10);
}
*(ya+k)=*(ya+k)/50;/*求 50 次采样平均值*/
k++;
if (k==639) break;/*画到屏幕最右端,程序结束*/
}
line(0,400,639,400);line(0,400,0,400-*(ya+0));
/*画点*/
for (k=1;k<=639;k++) lineto(k,400-*(ya+k));
getch();
}
/*注意:可根据被测信号的快慢,选择采样平均值 i 及
    延时值 j*/
```

参考文献

[1] 牛原. 光的衍射实验的研究. 物理实验,1994,14(4):157—158

[2] 赵凯华,钟锡华. 光学 上册. 北京:北京大学出版社,1984: 209—213

[3] 赵凯华,钟锡华. 光学 下册. 北京:北京大学出版社,1984: 2—7

实验 C－4 周期性外力驱动的倒摆混沌运动实验

现代科学技术研究发现,非线性是真实世界的普遍特性,非线性问题大量出现在自然科学、社会科学和工程科学中,并起着重要的作用.混沌的研究是 20 世纪物理学的重大事件,自从麻省理工学院的 Lorenz 教授在60 年代进行了开创性的研究以来,已有更多的学者深入探索,逐步揭示了混沌运动的基本特征,即确定性中包含的非周期性和不可预测性,对初值的敏感性,等等."混沌"译自英语中"chaos"一词,原意是混乱、无序,在现代非线性理论中,混沌则是泛指在确定体系中出现的貌似无规则的、类随机的运动.

目的

1. 了解倒摆混沌运动实验仪的结构、原理 ;
2. 掌握混沌运动的分析方法.

仪器和用具

倒摆混沌运动实验仪、计算机、数据处理软件.

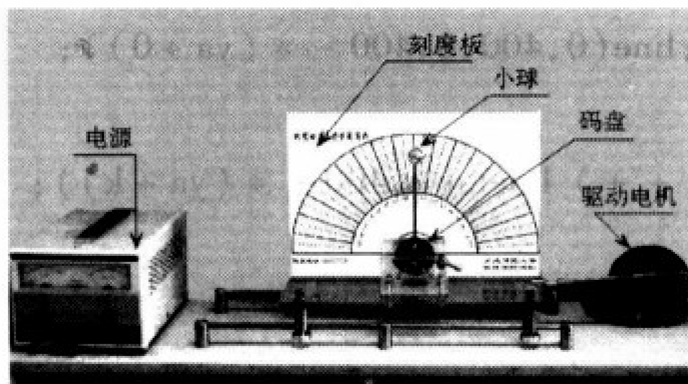


图 C－4－1 实验装置图

原理

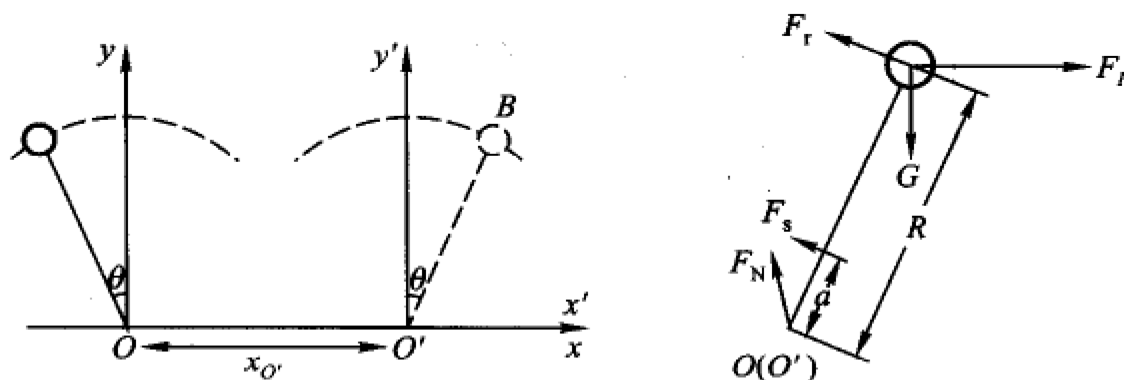


图 C－4－2　坐标系的选取和倒摆的受力分析

根据图 C－4－1 所示实验仪建立图 C－4－2 所示的坐标系，设 O 为系统往复运动的中心点，选此点为惯性系 Oxy 的坐标原点，选倒摆杆与小车连接处的 O' 为非惯性系 $O'x'y'$ 的原点，以小球为研究对象，在任意时刻 t，小球位于 B 点 $O'B$ 与 $O'y'$ 的夹角为 θ，其中 G、F_s、F_I、F_r、F_n 分别是小球所受重力、弹力、惯性力、阻尼力和支持力. 取 O' 为参考点[1,2,3]，可得小球在非惯性系中的动力学方程为

$$\frac{d^2\theta}{d\tau^2} = \sin\theta - k\theta - \gamma\frac{d\theta}{d\tau} + A\cos\theta\cos\omega_0\tau \qquad (C-4-1)$$

式中，$\tau = \sqrt{g/R}t$，$k = k'a^2/mgR$，k' 为弹簧劲度系数，$\gamma = \bar{\gamma}/m$，$\bar{\gamma}$ 为阻尼系数，$A = r_0\omega_d^2/R$，r_0 表示曲柄的长度，ω_d 为电机的转动角频率. 式(C－4－1)反映了小球在非惯性系 $O'x'y'$ 中的运动所遵循的动力学规律. 通过研究小球在非惯性系中的运动规律可得到它在惯性系中的运动规律. 小球在惯性系 Oxy 中的位置通过解式(C－4－1)得

$$\begin{cases} X(t) = X_{O'}(t) + R\sin\theta(t) \\ Y(t) = R\cos\theta(t) \end{cases} \qquad (C-4-2)$$

计算机数据采集和电机控制角频率原理：

利用单片机和计算机编程技术对角度信号和电机的角频率信号进行采集，同时利用所采集的数据控制电机的角频率，如图 C－4－3 系统框图所示.

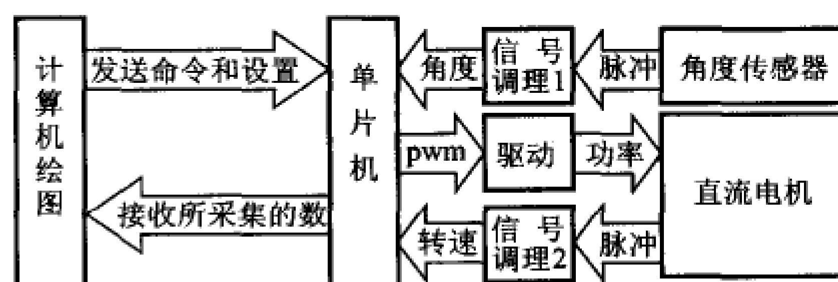


图 C-4-3 系统框图

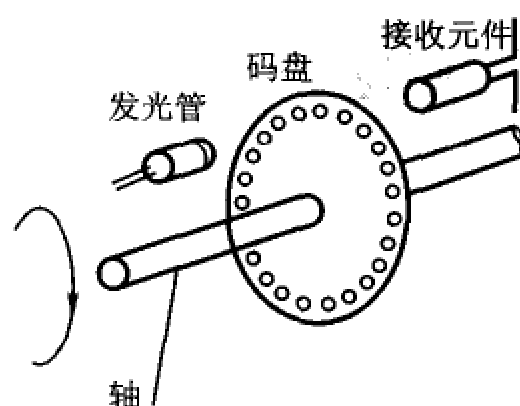


图 C-4-4 角度传感器装置图

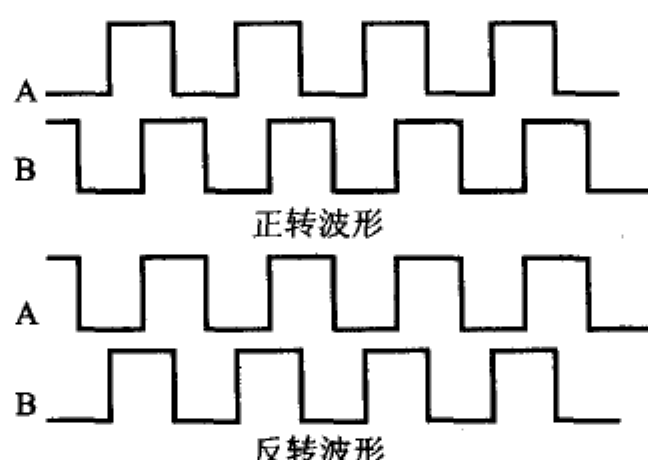


图 C-4-5 角度传感器输出的两路波形图

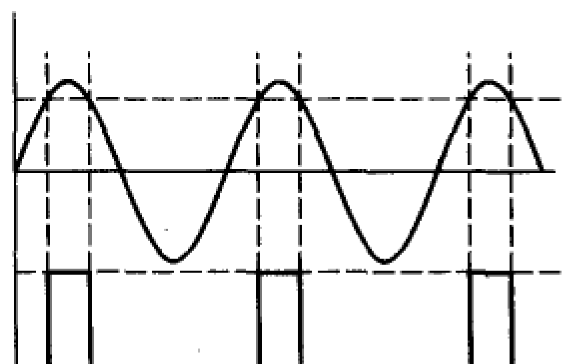


图 C-4-6 电机测速输出及调理后的波形图

利用角度传感器的发光管、码盘和接收元件（如图 C-4-4 所示）采集倒摆偏转角度的一定时序的脉冲信号（如图 C-4-5 所示），经过信号调理电路 1 变为单片机可以识别的信号，单片机对信号进行计数和处理得到摆所偏转的角度及方向.

利用直流电机内部的测速模块得到周期与电机角频率成反比的信号，经过调理电路 2 转换为单片机可识的脉冲信号（如图 C-4-6 所示）. 单片机对它进行周期测量得到电机角频率. 使用电机角频率并结合一定的算法，产生 pwm（脉冲宽度调制）控制信号，它经过功率驱动电路驱动直流电机转动. 在这一过程中，直流电机的测速部分与直流电机的驱动部分经过单片机构成闭环控制系统，达到使电机速度保持恒定的目的.

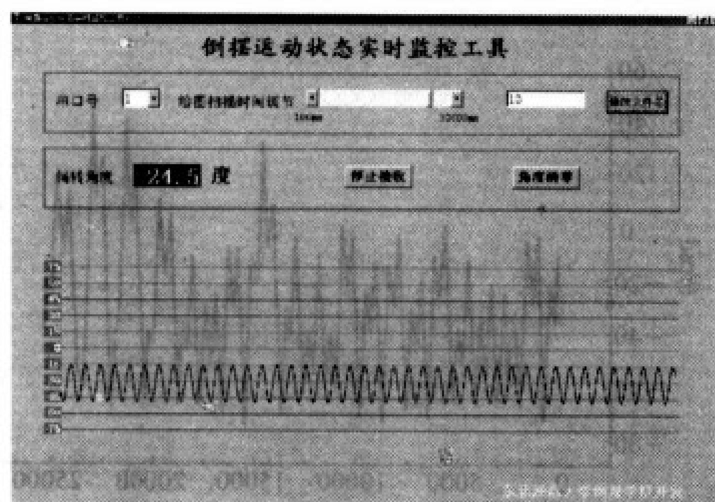
计算机和单片机通过串口进行通信，计算机界面使用 Visual Basic 语言编制，通过计算机下达命令. 电机速度调节部分可改变电机的角频率，同时单片机把采集到的电机角频率通过串口发送到计算机进行实时角频率显示. 单片机把摆偏转的角度数据通过串口发送到计算机，计算机接收到数据后进行时域图和相图的实时绘制.

在实验过程中，用我们自主开发的软件进行测量，得到的数据在计算机上存储成“＊.dat”文件，同时在显示器上显示摆球的摆动状态.

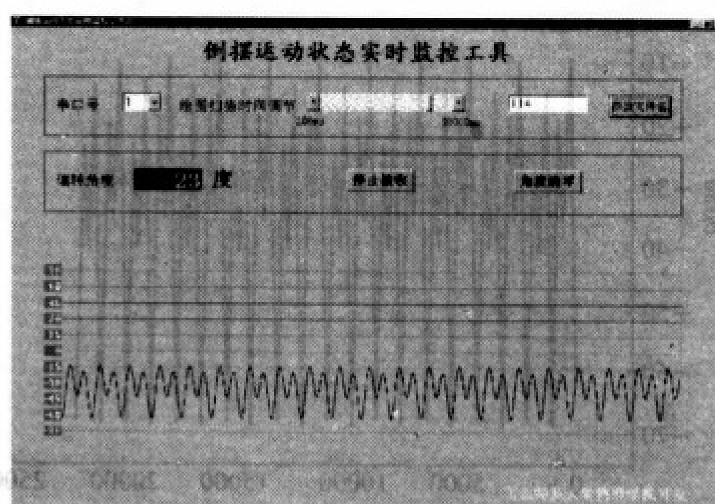
实验内容

将摆置于小车上，车的一端用刚性曲柄连杆与变频电机相连，通过电机的转动，驱动小车沿水平方向做往复运动. 摆轴同高精度光电码盘连接，通过计算机接口实时将摆的角度变化传送到计算机. 固定摆的长度，通过改变输入变频电机的电压值来调节驱动电机的角频率，电机的角频率是系统中的一个可调参数[4].

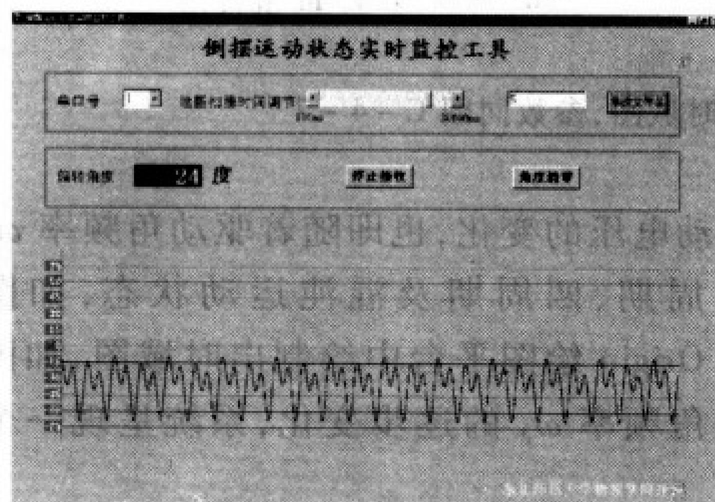
1. 固定驱动电压 $U=15$ V（即频率固定），而随着摆长 R 的改变，系统分别呈现一周期（1P）、二周期（2P）、四周期（4P）及混沌状态，结果如图 C－4－7 所示. 实验结果表明：随着摆长 R 的逐步变大，系统呈现一个倍周期分岔到混沌的过程.



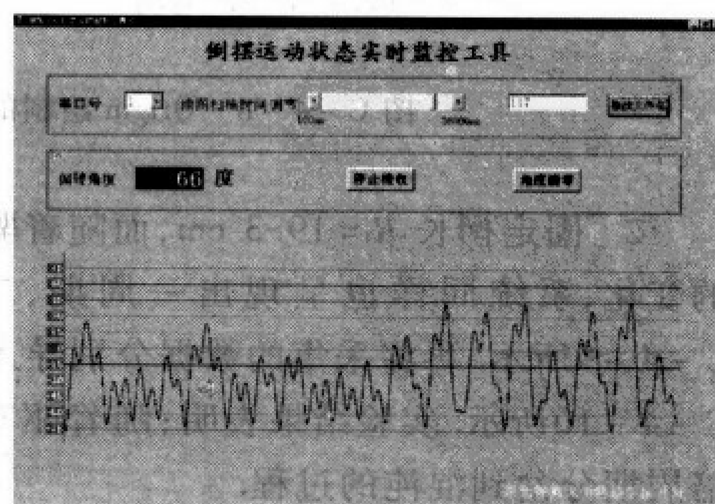
(a)　$R=18.8$ cm 1P 运动



(b)　$R=19.0$ cm 2P 运动



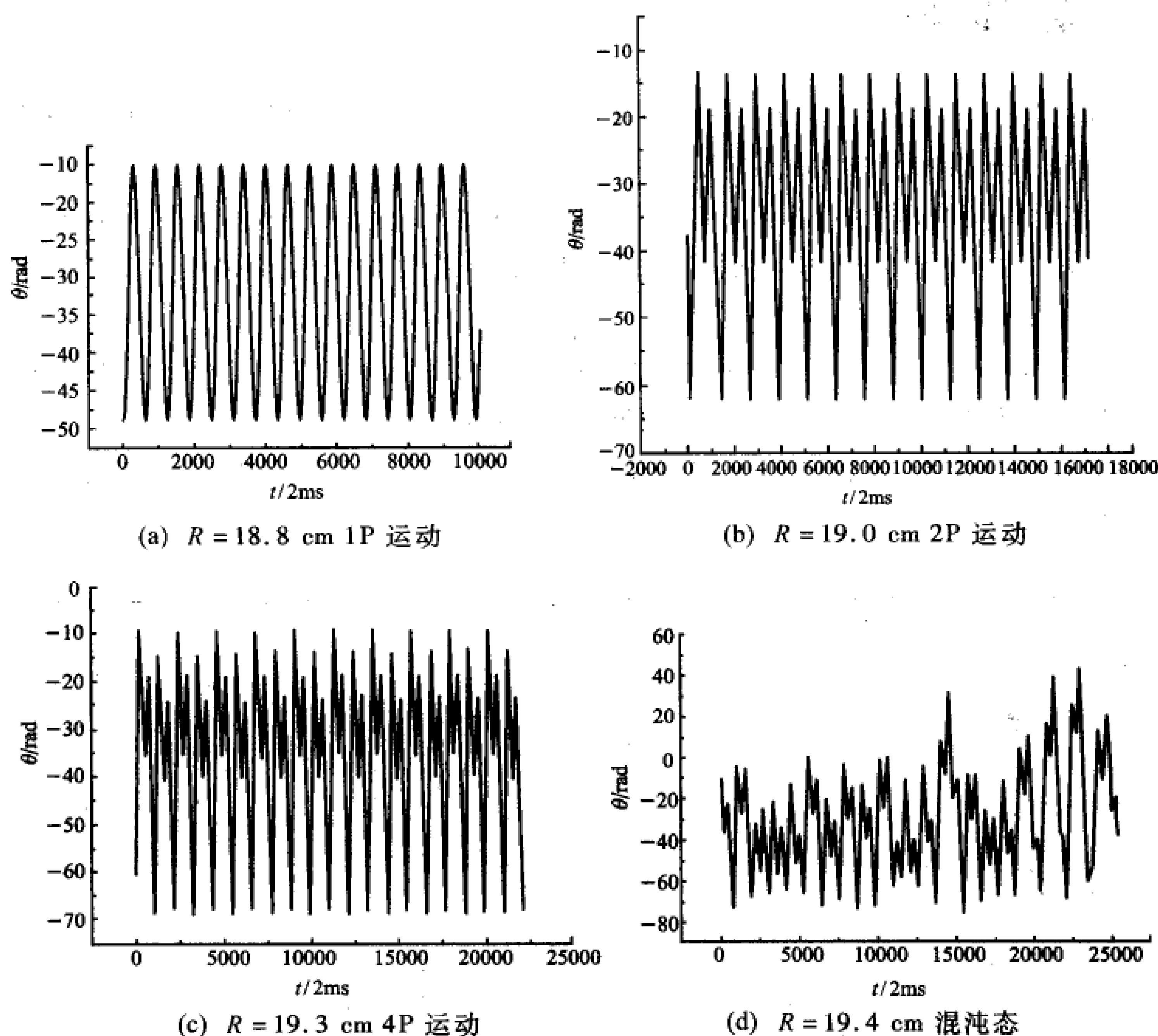
(c)　$R=19.3$ cm 4P 运动



(d)　$R=19.4$ cm 混沌态

图 C－4－7　实验测量得到的时域图，其中固定 $U=15$ V

图 C－4－8 则是将采集的数据分别再导入 Origin 绘图平台绘出的时域图，其参数条件与图 C－4－7 相同.

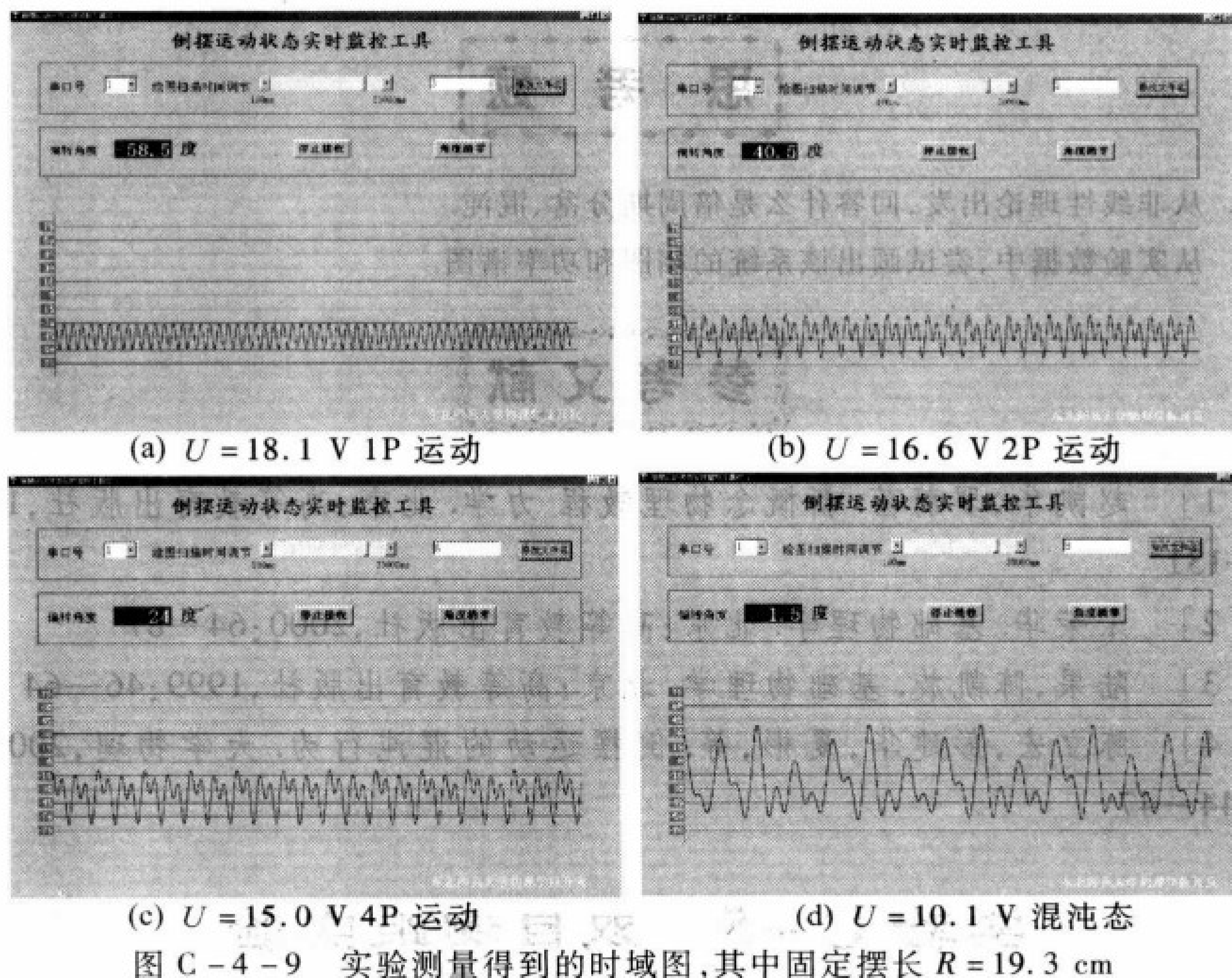


(a) $R=18.8$ cm 1P 运动　　(b) $R=19.0$ cm 2P 运动

(c) $R=19.3$ cm 4P 运动　　(d) $R=19.4$ cm 混沌态

图 C－4－8　Origin 绘制的时域图，参数同图 C－4－7

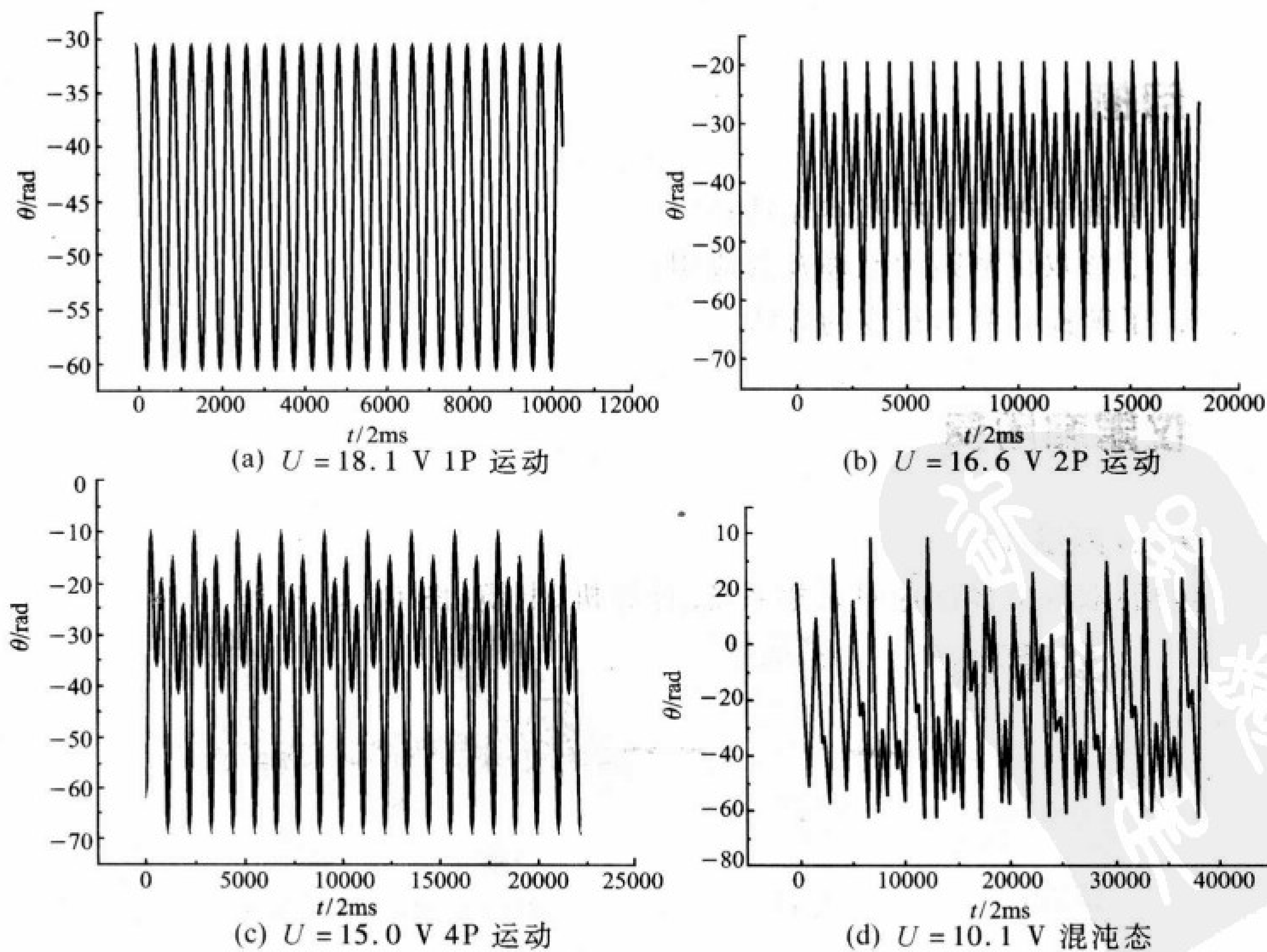
2. 固定摆长 $R=19.3$ cm，而随着驱动电压的变化，也即随着驱动角频率 ω_d 的变化，系统同样也呈现出一周期、二周期、四周期及混沌运动状态，如图 C－4－9所示. 再将采集的数据分别导入 Origin 绘图平台中绘制出时域图，如图 C－4－10所示. 实验结果表明；随着驱动角频率 ω_d 的逐步变化，系统呈现一个倍周期分岔到混沌的过程.



(a) $U=18.1$ V 1P 运动　(b) $U=16.6$ V 2P 运动

(c) $U=15.0$ V 4P 运动　(d) $U=10.1$ V 混沌态

图 C－4－9　实验测量得到的时域图，其中固定摆长 $R=19.3$ cm



(a) $U=18.1$ V 1P 运动　(b) $U=16.6$ V 2P 运动

(c) $U=15.0$ V 4P 运动　(d) $U=10.1$ V 混沌态

图 C－4－10　Origin 绘制的时域图，参数同图 C－4－9

思考题

1. 从非线性理论出发，回答什么是倍周期分岔、混沌.
2. 从实验数据中，尝试画出该系统的相图和功率谱图.

参考文献

[1] 赵凯华，罗蔚茵. 新概念物理教程 力学. 北京：高等教育出版社，1995：129—131

[2] 朱荣华. 基础物理学. 北京：高等教育出版社，2000：64—87

[3] 陆果，陈凯旋. 基础物理学. 北京：高等教育出版社，1999：46—64

[4] 陈立宏，彭建华，夏彬，等. 倒摆运动的混沌行为. 大学物理，2005，24(9)：44—47

实验 C-5 双目测距实验

目的

1. 了解电视测量的基本原理；
2. 了解双目测距的原理及其应用；
3. 了解提高测量精度的方法.

仪器和用具

• 双目测距仪

包括：双目立体图像对采集系统、计算机、电缆(图 C-5-1).

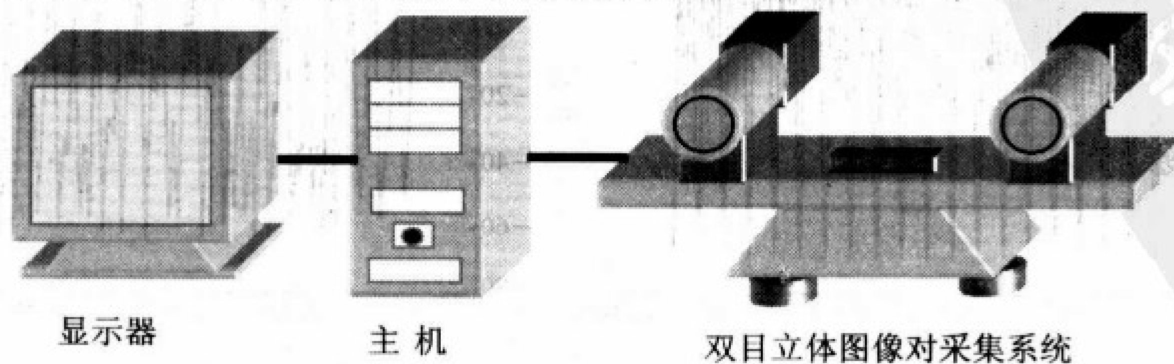


图 C-5-1 双目测距系统的设备

- 双目测距教学软件包

包括;双目立体图像对采集卡驱动程序、双目立体图像对处理软件.

原理

1．电视测量的基本原理

电视测量是通过对目标图像的实时探测,实现对目标的空间位置的测量.根据几何光学共轭成像原理,对于一个成像光学系统,其物空间的一点 A 唯有一个像点 A'在其像空间与之对应(见图 C－5－2).所以探测物空间的目标,可以在像空间探测它的图像.只要测量出像点 A'相对于电视物镜视轴的偏差 $\Delta x'$和 $\Delta y'$,就知道目标相对于同一轴线的偏差 Δx 和 Δy.

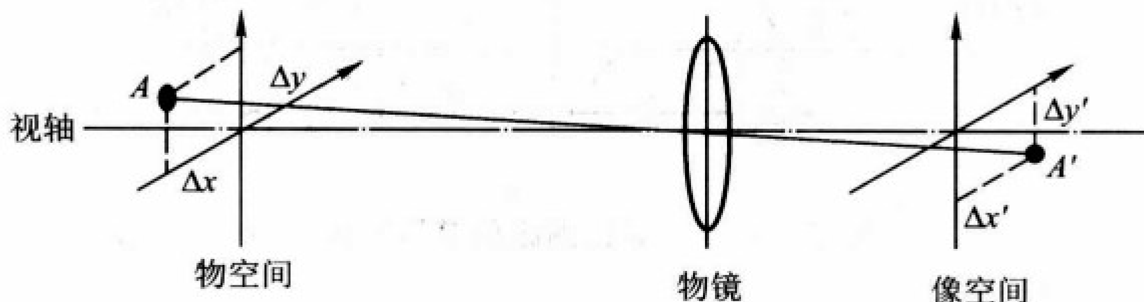


图 C－5－2　物像共轭关系

用 CCD 摄像机作图像传感器,CCD 靶面就是像空间.CCD 摄像机把它的靶面上的一幅幅由目标及其背景组成的光学图像变成按时间顺序传送的视频电压信号送出.这个视频电压信号经过计算机处理和分析,就得到了目标图像偏离电视测量系统视轴的脱靶量.

如果在靶面上设置一个 $x-y$ 坐标系,坐标原点取在光学系统视轴穿过靶面的一点.被瞄准的目标成像到靶面的(x,y)点,目标偏离坐标原点的量 $\Delta x,\Delta y$(见图 C－5－3)就是电视测量的脱靶量.这就是电视测量的基本工作原理.

Δx 为目标在水平方向的脱靶量,Δy 为目标在垂直方向的脱靶量.

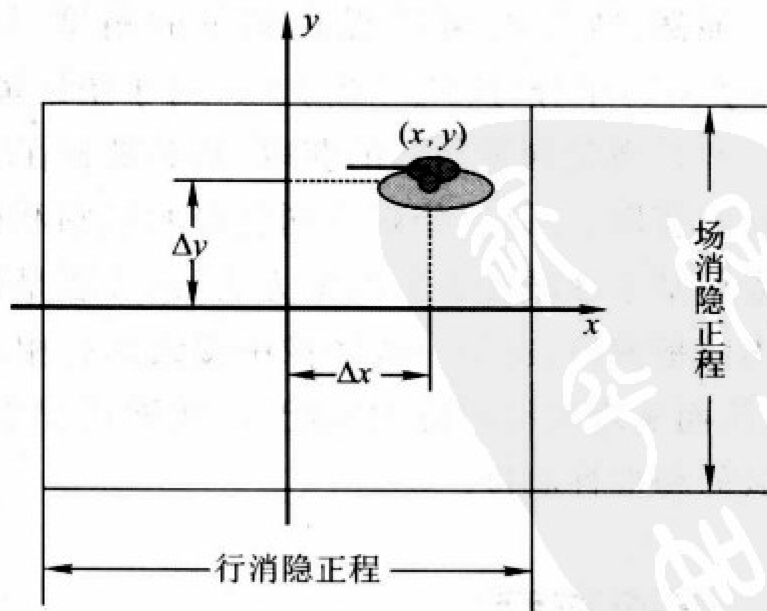


图 C－5－3　电视测量的原理示意图

2. 双目测距的基本原理[1]

使用两个位置上有差别的摄像机摄取三维景物，形成两幅图像（立体图像对），可以获得物体的距离信息. 两个 CCD 摄像机（CCD1、CCD2）仿照人眼的结构左右放置，相距为 $2d$ 距离，为了简化问题，假设两个摄像机的视轴是平行的（如图 C－5－4 所示）.

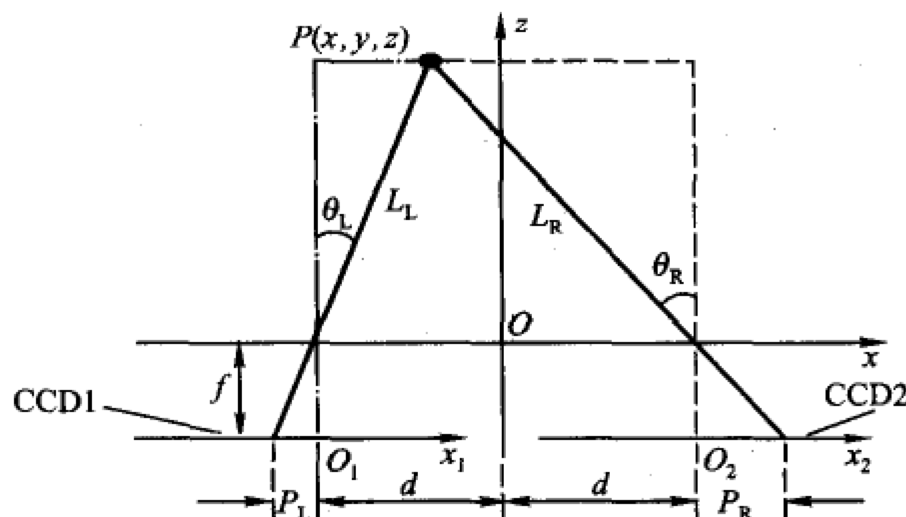


图 C－5－4 双目测距的基本原理

目标 $P(x,y,z)$ 分别在 CCD1 和 CCD2 上成像，并测得脱靶量 P_L 和 P_R，P_L、P_R 本身是代数量，它们的原点分别是 O_1 和 O_2. 根据三角测量原理不难给出如下计算结果：

$$z=\frac{2df}{P_R-P_L}=\frac{2d}{\tan\,\theta_L-\tan\,\theta_R} \tag{C－5－1}$$

$$L_L=z/\cos\,\theta_L,L_R=z/\cos\,\theta_R \tag{C－5－2}$$

显然，增大 d，可以提高测量的精度. 因为目标在有限距离之内，所以式（C－5－1）中分母（P_R-P_L）>0. 对于望远镜系统，L 可以近似用 z 来代替.

双目视觉深度信息的获取，其关键就在于立体图像对（即左右图像对）视差信息的获取，而这又依赖于同名点的识别和确定，究其根本是图像的匹配. 本实验采用基于区域相关的匹配方法，该方法是把一幅图像中的某一点的灰度邻域作为模板窗口，在另一幅图像中搜索具有相同（或相似）灰度值分布的对应点邻域，从而实现两幅图像的匹配. 在搜索过程中，通常是以相关函数作为两个搜索邻域的相似性测度.

实验内容

1. 双目测距系统的建立

（1）将双目图像采集卡插入计算机的 PCI 插槽，并按说明安装好，在计算机屏幕上看到如图 C－5－5 所示的界面；

（2）将两个摄像机的视频输出用视频电缆连到图像采集卡的两路输入；

（3）摄像机通电，按下［实时显示］键，在计算机屏幕上看到左右两幅图像（如图 C－5－5 所示）.

2．双目立体图像对的采集

（1）调整双目摄像机的位置与姿态，瞄准被测目标；

（2）按下［停止显示］键，图像被冻结并存储到计算机中.

3．双目测距

（1）用鼠标在左图像中任意选定一点，按下［寻找匹配点］键，双目系统自动在右图像中找到对应的匹配点；

（2）计算机自动计算选定点在左右图像中的位置、选定点的距离，并显示在相应的对话框内.

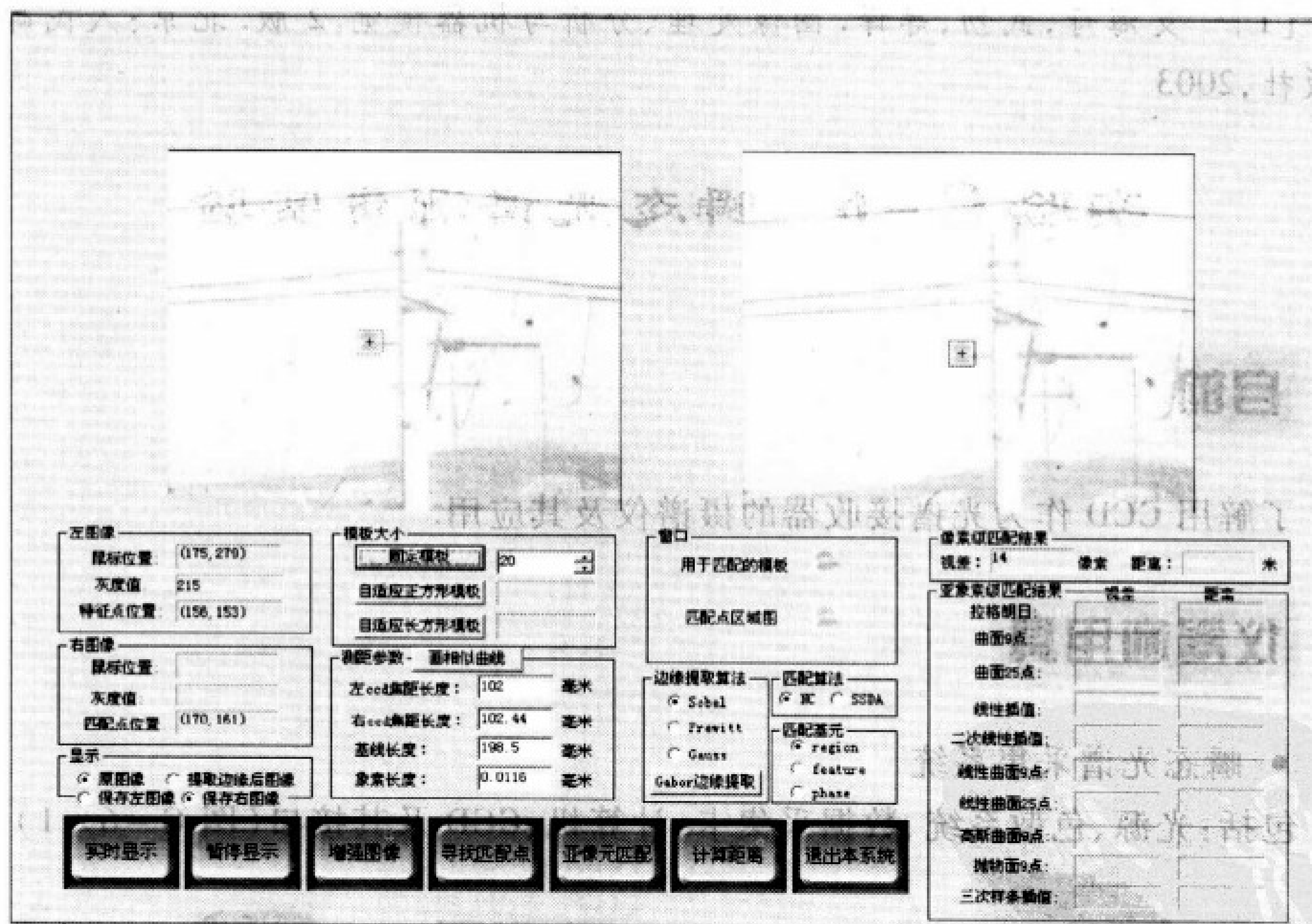


图 C－5－5　双目系统采集的左右图像对

4．双目测距结果的分析

（1）根据仪器给出的摄像机焦距、两个摄像机的基线距离和脱靶量，利用公式（C－5－1）计算目标点的距离；

(2) 与实际测量的结果进行比较；

(3) 测量不同距离的目标，分析测距精度与距离的关系；

(4) 对复杂目标和局部遮挡的目标测距；

(5) 归纳分析双目测距的优点和局限性；

(6) 讨论双目测距系统的应用.

思 考 题

1. 请用这套装置实现空间中两点间距离的测量.
2. 请上网查一下有关双目测距的应用实例.

参考文献

[1] 艾海舟，武勃，等译. 图像处理、分析与机器视觉. 2 版. 北京：人民邮电出版社，2003

实验 C－6 瞬态光谱测量实验

目的

了解用 CCD 作为光谱接收器的摄谱仪及其应用.

仪器和用具

- 瞬态光谱采集系统

包括：光源、色散系统、数据采集卡、计算机、CCD 及其接口(图 C－6－1).



图 C－6－1 组成瞬态光谱采集系统的设备

● 光谱采集教学软件包

包括:数据采集卡驱动程序、光谱采集软件.

原理

1. 光谱及其分类

光波是由原子内部运动的电子产生的.各种物质的原子内部电子的运动情况不同,所以它们发射的光波也不同.因此,将样品或光源发出的光经过色散系统后,就可得到光谱.研究不同物质的发射光和吸收光的情况,有重要的理论和实际意义,已成为一门专门的学科——光谱学.

物体发光直接产生的光谱叫做发射光谱.发射光谱有两种类型:连续光谱和明线光谱.连续分布的包含有从红光到紫光各种色光的光谱叫做连续光谱.炽热的固体、液体和高压气体的发射光谱是连续光谱.例如电灯丝发出的光、炽热的钢水发出的光都形成连续光谱.只含有一些不连续的亮线的光谱叫做明线光谱.明线光谱中的亮线叫做谱线,各条谱线对应于不同波长的光.稀薄气体或金属的蒸气的发射光谱是明线光谱.明线光谱是由游离状态的原子发射的,所以也叫原子光谱.观察固态或液态物质的原子光谱,可以把它们放到煤气灯的火焰或电弧中去烧,使它们汽化后发光,就可以从分光镜或谱仪中看到它们的明线光谱.实验证明,原子不同,发射的明线光谱也不同,每种元素的原子都有一定的明线光谱.每种原子只能发出具有本身特征的某些波长的光,因此,明线光谱的谱线叫做原子的特征谱线.利用原子的特征谱线可以鉴别物质和研究原子的结构.

高温物体发出的白光(其中包含连续分布的一切波长的光)通过物质时,某些波长的光被物质吸收后产生的光谱,叫做吸收光谱.例如,让弧光灯发出的白光通过温度较低的钠气(在酒精灯的灯芯上放一些食盐,食盐受热分解就会产生钠气),然后用分光镜或谱仪来观察,就会看到在连续光谱的背景中有两条挨得很近的暗线.这就是钠原子的吸收光谱.值得注意的是,各种原子的吸收光谱中的每一条暗线都跟该种原子的发射光谱中的一条明线相对应.这表明,低温气体原子吸收的光,恰好就是这种原子在高温时发出的光.因此,吸收光谱中的谱线(暗线),也是原子的特征谱线,只是通常在吸收光谱中看到的特征谱线比明线光谱中的少.

由于每种原子都有自己的特征谱线,因此可以根据光谱来鉴别物质和确定它的化学组成,这种方法叫做光谱分析.做光谱分析时,可以利用发射光谱,也可以利用吸收光谱.这种方法的优点是非常灵敏而且迅速.某种元素在物质中的含量达 10^{-10} g,就可以从光谱中发现它的特征谱线,因而能够把它检查出来.光谱

分析在科学技术中有广泛的应用[1]. 例如,在检查半导体材料硅和锗是不是达到了高纯度的要求时,就要用到光谱分析. 在历史上,光谱分析还帮助人们发现了许多新元素. 例如,铷和铯就是从光谱中看到了以前所不知道的特征谱线而被发现的. 光谱分析对于研究天体的化学组成也很有用. 19 世纪初,在研究太阳光谱时,发现它的连续光谱中有许多暗线. 最初不知道这些暗线是怎样形成的,后来人们了解了吸收光谱的成因,才知道这是太阳内部发出的强光经过温度比较低的太阳大气层时产生的吸收光谱. 仔细分析这些暗线,把它跟各种原子的特征谱线对照,人们就知道了太阳大气层中含有氢、氦、氮、碳、氧、铁、镁、硅、钙、钠等几十种元素.

2. CCD 技术

CCD(Charge Coupled Device)即电荷耦合器件,是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型半导体器件,其设计思想是由美国贝尔实验室的 Boyer 与 Smith 于 70 年代提出的[2,3]. 20 多年来,CCD 技术取得了惊人的进展,已经在成像、信号处理和存储三大领域获得了广泛的应用. 特别是在传感器应用方面发展迅速,已成为现代光电子学与现代测试技术中最活跃、最富有成果的新兴领域之一. 它具有精度高、转换效率高、功耗低、尺寸小、寿命长、性能稳定等优点. 当前,国内外许多大学、科研机构都把 CCD 与光学仪器相结合,研制出了许多应用 CCD 来实现光电转换的新型光电测量仪器.

一个 CCD 芯片是由几万甚至几百万个光敏微元组成的,这些微元组合成线阵或面阵 CCD 探测器. 组成 CCD 的光敏微元是 MOS(金属氧化物半导体)结构. 在 P 型(或者 N 型)半导体衬底上制作氧化层,然后在此绝缘层上按一定的次序排列金属电极,构成了 CCD 的光敏微元. 在对 MOS 的金属栅极施加电压之前,P 型半导体中空穴的分布是均匀的. 在电极作用下,半导体中形成能容纳电荷的耗尽区,在合适的光照强度和光照时间下 CCD 中各个像元产生的电荷量的分布能够正确反映出成像面上的光强分布. 为避免电压消逝后耗尽区也消失,电荷必须向其他位置转移. 通过按一定规则交替变化的驱动脉冲加到 CCD 各电极上,使电荷在交替的电压作用下按一定的方向逐单元顺序迁移,最后在检测端通过电荷检测回路将电荷转化为电信号,送给后面的处理单元进行信号调制,以把图像信号转变为通用的视频信号(PAL 或 NTSC). 因此,当被测目标的光信号通过光学系统在 CCD 光敏元上成像时,CCD 器件便将光敏元上的光信号转换成与光强成正比例的电荷量. 用一定频率的时钟脉冲对 CCD 进行驱动,在 CCD 的输出端便可获得被测目标的视频信号. 视频信号中的每一个离散信号的大小对应着一个光敏元所接收光强的强弱,而信号输出的时序则对应着 CCD 光敏元位置的顺序. 这样,CCD 用自身扫描方式完成了信息从空间域到时间域的转换. 这种信号经过视频图像采集接口送入计

算机中，以便进行各种所需的处理.

实验内容

1. 光谱采集系统的建立

将 CCD 放在分光计或光谱仪的焦平面上，通过 USB 插口与计算机相连，并按说明书安装好软件. 控制面板如图 C－6－2 所示. 右上角窗口实时显示光谱，

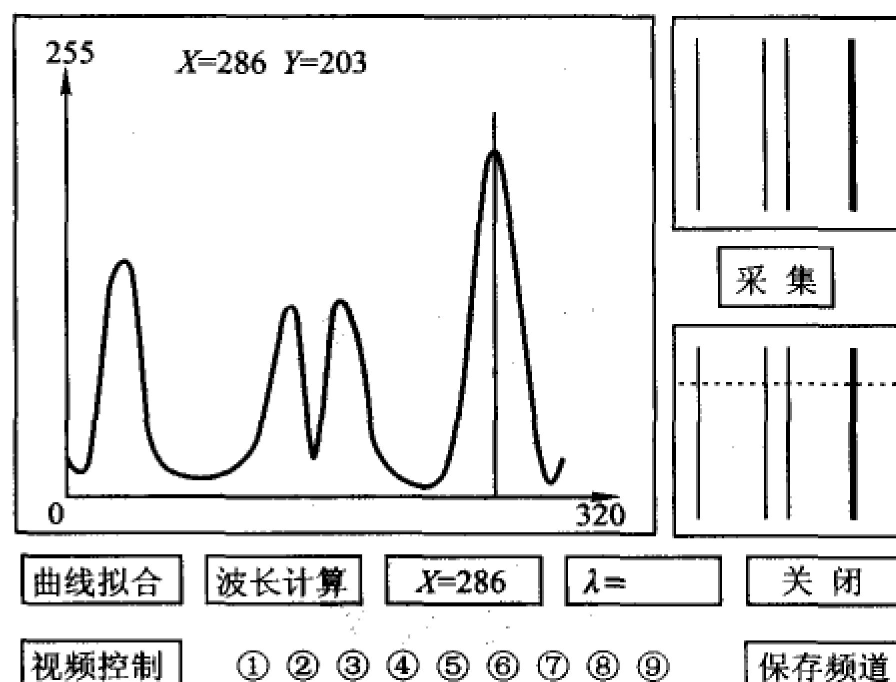


图 C－6－2 瞬态光谱仪控制面板

按下采集按钮，该时刻的光谱显示于右下角窗口中. 在右下角窗口中有一条虚横线，此线可用鼠标托拽上下移动. 左侧大窗口是光强显示窗口，在此窗口中，光强分布曲线反映的是右下角窗口中横虚线所处位置的各点光强. 在光强显示窗口中有一竖线，它是一条标线，当用鼠标点住它左右拖拽时，竖线所在的位置 X 和所对应的光强 Y，都在发生变化，并显示在大窗口的上面. 视频控制按钮，用于调整显示的亮度、对比度、颜色等. 点击视频控制按钮可跳出一相应窗口，调节后按[确定]，即返回原窗口. 曲线拟合按钮，用于对本仪器进行定标. 单击时，将光强显示窗口中已知元素光谱光强极大值处 X 和 λ 的值用键盘输入计算机. 定标用的 X、λ 值输入完毕后双击，曲线拟合按钮进行曲线拟合，得到定标曲线方程. 波长计算按钮，用于输入谱线的 X 值，计算波长 λ. 保存频道按钮，用于保存 9 幅光谱图，频道分别是①、②、…、⑨. 当 9 个频道存满时，若还要存，只能在其中进行替换. 操作时点击保存频道按钮，将跳出一窗口，其上有①、…、⑨频道号，要存到第几频道，点击相应的频道号即可，然后点击[确定]即可回原窗口，要显示第几频道的光谱，直接点击该频道号即可.

2. 用汞灯对光谱采集系统定标

将汞灯放置于狭缝前,调节光学系统,使计算机屏幕上实时光谱显示窗口中清晰显示汞的各条谱线.用鼠标点击采集按钮,则采集右上窗口中的光谱显示在右下窗口中,调整右下角窗口中虚横线的位置,这样在光强显示窗口会显示所采集的光谱的光强分布图.用鼠标点住标线左右移动,将各光强极大值点的位置 X 和波长 λ 记录下来并输入计算机中,双击曲线拟合按钮,进行曲线拟合,得到我们这台光谱仪的定标曲线方程.

3. 取几片植物的叶子弄碎,放入酒精中浸泡,12 小时后叶绿素融入酒精中.观察叶绿素的吸收带,并测量吸收带中心波长.

4. 用酒精灯或高压放电使钠盐、钾盐蒸发,观察光谱的变化情况.

5. 测量白炽灯光谱.

思考题

1. 请上网查一下有关光谱分析的应用实例.
2. 用吸收光谱法测量透光物质成分与含量(一般用氘、钨卤素灯作宽谱光源).

参考文献

[1] 陈新坤.原子发射光谱分析原理.天津:天津科学技术出版社,1991
[2] 王元庆.新型传感器原理及应用.北京:机械工业出版社,2003
[3] 王庆有.CCD 应用技术.天津:天津大学出版社,2000

[General Information]
书名=普通高等教育“十一五”国家级规划教材　普通物理实验四综合及设计部分　（第四版）
作者=
页数=
出版社=
出版日期=
SS号=11926703
DX号=000006320616
url=http://www.zirankxzl.cn/DrsPath.do?kid=65656D666A6B6467313538343135313 4&username=hzsfxy&spagenum=1&pages=50&fid=8407351&a=d04abdb401972230e5ca334a9be5bdd0&btime=2011-11-18&etime=2011-12-08&template=bookdsr1&firstdrs=http%3A%2F%2Fbook1.duxiu.com%2FbookDetail.jsp%3FdxNumber%3D000006320616%26d%3D258AFDCE16D2BB529CB436199BABFDEA